

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 8, 2022

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Удобрения

Влияние длительного применения систем удобрения разной интенсивности на урожайность и качество зерна овса

Г. Е. Мерзлая, А. Д. Федулова, А. Ю. Гаврилова

3

Влияние систематического применения органических и минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность картофеля в кормовом севообороте в длительном опыте Европейского Севера

Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова

10

Влияние различных уровней удобренности на урожайность льна-долгунца и культур льняного севооборота

Н. Н. Кузьменко

17

Регуляторы роста растений

Влияние кремнийсодержащих биостимуляторов на холодостойкость пшеницы и сахарной свеклы

А. О. Гранкина, Е. А. Бочарникова, В. В. Матыченков

22

Эффективность влияния производных пиразолопиридинов на продуктивность озимой пшеницы

В. В. Тараненко, И. Г. Дмитриева, В. С. Муравьев

28

Пестициды

Эффективность действия свекловичных гербицидов на сорную растительность в посеве сахарной свеклы в зависимости от величины рН используемой воды и ее загрязненности бытовыми моющими средствами

Е. А. Дворянкин

33

Агроэкология

Влияние минерального питания на фитосанитарную обстановку в посевах ярового рапса на Северо-Западе РФ

А. М. Шпанев, М. А. Фесенко

44

Эффективность некорневых подкормок гуминовыми препаратами яровой пшеницы в почвенно-климатических условиях Курской области

В. И. Лазарев, Ж. Н. Минченко, А. Я. Башкатов, Н. Н. Трутаева

51

Раздельное и последовательное действие стресс-факторов разной природы на фотосинтетический аппарат пшеницы

Е. С. Холопцева, Ю. В. Венжик

59

Экотоксикология

Распределение мышьяка и фосфора в системе почва—растение при выращивании амаранта на почвах разных типов

М. А. Ефремова, Ф. Адимале

69

Содержание аминокислот в растениях при разных уровнях содержания кобальта в почве

Г. Я. Елькина

78

ОБЗОРЫ

Применение гидроксикоричных кислот на лекарственных культурах

Н. И. Ковалев

87

Contents

No. 8, 2022

EXPERIMENTAL ARTICLES

Fertilizers

Productivity and Quality of Oat Grain with Long-Term Use of Fertilizer Systems of Different Intensity

G. E. Merzlaya, A. D. Fedulova, A. Y. Gavrilova

3

Effect of Systematic Application of Organic and Mineral Fertilizers on Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and Potato Productivity in Fodder Crop Rotation in the Long-Term Experience of the European North

N. T. Chebotarev, O. V. Brovarova

10

Effect of Different Levels of Fertilization on the Yield of Flax and Crops Flax Crop Rotation

N. N. Kuzmenko

17

Plant Growth Regulators

Effect of Silicon-Containing Biostimulants on the Cold Resistance of Wheat and Sugar Beet

A. O. Grankina, E. A. Bocharnika, V. V. Matychenkov

22

Study of the Effect of the Pyrazolopyridine Derivatives on Winter Wheat Productivity

V. V. Taranenko, I. G. Dmitrieva, V. S. Muravyov

28

Pesticides

Effect of Beet Herbicides on Weed Plants in Sugar Beet Fields Depending on pH of Water Used and Its Pollution with Detergents

E. A. Dvoryankin

33

Agroecology

Influence of Mineral Nutrition on the Phytosanitary Situation in Spring Rape Crops in the North-West of the Russian Federation

A. M. Shpanev, M. A. Fesenko

44

Effectiveness of Foliar Fertilizing with Humic Preparations of Spring Wheat in the Soil and Climatic Conditions of the Kursk Region

V. I. Lazarev, Zh. N. Minchenko, A. Ya. Bashkatov, N. N. Trutaeva

51

Separate and Consistent Effect of Stress Factors of Different Nature on Photosynthetic Apparatus of Wheat

E. S. Kholoptseva, Yu. V. Venzhik

59

Ecotoxicology

Distribution of Arsenic and Phosphorus in the Soil-Plant System when Growing Amaranth on Different Types of Soils

M. A. Efremova, F. Adimale

69

Content of Amino Acids in Plants at Different Levels of Cobalt in the Soil

G. Ya. El'kina

78

REVIEWS

Applying of Hydroxycinnamic Acids on Medicinal Crops

N. I. Kovalev

87

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА ОВСА

© 2022 г. Г. Е. Мерзлая^{1,*}, А. Д. Федулова¹, А. Ю. Гаврилова^{2,**}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия*

² *Федеральный научный центр лубяных культур
214025 Смоленск, ул. Нахимова, 21, Россия*

**E-mail: lab.organic@mail.ru*

***E-mail: a.gavrilova.smi@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2022 г.

После доработки 07.04.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В длительном полевом опыте, заложенном в 1978 г., изучали влияние минеральных, органических и органо-минеральных систем удобрения различной интенсивности в действии и последствии на урожайность и качественные показатели зерна овса при возделывании в полевом севообороте на окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве Смоленской обл. Установлено положительное достоверное влияние систем удобрения на продуктивность овса сорта Скакун при оптимизации доз и сочетаний навоза и минеральных азотных, фосфорных и калийных удобрений как в действии, так и в последствии. Наименьшая в опыте урожайность зерна овса сорта Скакун, возделываемого в зернотравяном севообороте, составившая 1.8–2.1 т/га, получена в контроле, где удобрения не применяли. В действии все исследованные варианты систем удобрения обеспечили достоверный рост урожайности зерна овса по отношению к контролю. Высокая урожайность зерна овса с хорошим качеством (на уровне 4 т/га) формировалась при внесении трехкратных доз органо-минеральной (N90P90K90 + навоз 9 т/га) и минеральной (N90P90K90) систем удобрения. В последствии при возделывании овса на зерно эффективными были все системы удобрения, за исключением органо-минеральной системы в низких дозах. Прибавка урожайности зерна к контролю при органической системе составила 20.3, при минеральной — 38.4%, при органо-минеральных системах в 2–5-кратных дозах прибавки варьировали от 35 до 65.5%. Эффективное последствие органических и минеральных удобрений отмечено при применении органо-минеральной системы с четырехкратными дозами (N120P120K120 + + навоз 12 т/га), когда урожайность зерна овса составила 2.75 т/га, что было на 55.3% больше контроля без внесения удобрений. При этом получены высокие показатели качества зерна (массы 1000 семян (30.9 г), содержания белка (7.63%) и калия (0.45%)) при низком уровне содержания тяжелых металлов и мышьяка в зерне.

Ключевые слова: системы удобрения, действие и последствие, урожайность овса, качество зерна, белок, тяжелые металлы, мышьяк.

DOI: 10.31857/S0002188122080129

ВВЕДЕНИЕ

В условиях России среди зерновых культур важное место отводится овсу, который используют в продовольственных и фуражных целях. В структуре посевных площадей, занятых овсом, первое место принадлежит Алтайскому краю (14% от всех посевов), затем следует Новосибирская обл. (6.8%), Красноярский край (6.1%), республика Башкортостан (5.6%) и Тюменская область (4.0%). Общий сбор зерна овса в России (по данным за 2018 г.) составил 4.7 млн т [1].

Как следует из ряда научных работ [2–4], высокие урожаи овса в нашей стране и за рубежом получают на почвах при сбалансированном содержании в них питательных веществ. Овес лучше остальных зерновых культур переносит кислую реакцию почвенного раствора, а также усваивает питательные элементы из почвы. Наиболее эффективно внесение удобрений под овес в районах с достаточной влагообеспеченностью. По данным Географической сети опытов с удобрениями, оптимальная годовая доза минеральных удобрений

под овес в среднем в Российской Федерации составляет 171 кг питательных веществ (N68P63K40) [5]. Известно также, что в зависимости от конкретных почвенных и погодных условий дозы удобрений при возделывании овса необходимо дополнительно уточнять и корректировать. В повышении урожайности сельскохозяйственных культур, прежде всего зерновых, решающая роль принадлежит оптимизации доз и сочетаний минеральных и органических удобрений [3, 6, 7]. Немаловажное значение при этом имеет эффект последствий удобрений [3, 5, 8, 9].

Наши исследования в длительном опыте были направлены на агроэкологическое обоснование оптимальных доз и сочетаний органических и минеральных удобрений при возделывании овса в зернотравяном севообороте в условиях окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы Нечерноземной зоны. Цель работы — изучение влияния длительного применения органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения разной интенсивности в действии и последствиях на урожайность и качество зерна овса сорта Скакун, содержание в нем белка, тяжелых металлов и мышьяка.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт был заложен в 1978 г. в поселке Ольша Смоленского р-на Смоленской обл. В вариантах опыта при возделывании овса в системе севооборота минеральные и органические удобрения вносили отдельно и в сочетаниях согласно разработанной схеме. Определяли урожайность зерна, проводили отбор проб зерна для их анализа на содержание белка, тяжелых металлов и мышьяка, который выполняли по общепринятым методикам.

Учет урожайности овса вели сплошным методом, массу 1000 зерен определяли по ГОСТ 10842-89, химические анализы растений проводили следующими методами: общий азот — по Кьельдалю (ГОСТ 134964-93), фосфор — по ГОСТ 26657-97, калий — методом пламенной фотометрии (ГОСТ 30504-97). Содержание тяжелых металлов (меди, цинка, свинца, кадмия) в зерне определяли по ГОСТ 30178-96, никеля, хрома, марганца, кобальта — по МУ № 01-19/47-11, ртути — по МУ 5178-90, мышьяка — по ГОСТ 26930-86.

Вносили удобрения в течение 4-х ротаций севооборота общей продолжительностью 30 лет. В севообороте при изучении действия удобрений навоз применяли под картофель в единичной дозе 20 т/га и под озимые зерновые — озимую рожь и озимую пшеницу — по 15 т/га. Минеральные

азотные, фосфорные и калийные удобрения вносили под картофель и озимые зерновые (озимую рожь, озимую пшеницу) в единичных дозах по 45 кг д.в./га, под яровые зерновые (ячмень, овес) — по 30 кг/га. Многолетние травы 2-х лет пользования возделывали без применения удобрений.

Из минеральных удобрений в опыте использовали N_{aa} , P_{cd} , K_x . В качестве органического удобрения вносили навоз крупного рогатого скота с использованием подстилки из соломы и древесных опилок влажностью 70% с содержанием на сырое вещество: общего азота — 9.46, P_2O_5 — 0.21, K_2O — 0.66%. Соотношение C : N в навозе было равно 19. В расчете на сухое вещество подстилочный навоз содержал: цинка — 7.4, кадмия — 0.1, хрома — 1.1, никеля — 0.1, меди — 0.6 мг/кг. Эффект последствий ранее внесенных удобрений изучали в 5-й ротации зернотравяного севооборота при ежегодной подкормке сельскохозяйственных культур, включая овес, азотными минеральными удобрениями в невысокой дозе N_{45} .

Повторность вариантов в опыте трехкратная. Общая площадь делянки 112 м², учетная — 48 м². Исследования вели на 2-х полях.

В работе представлены результаты исследования влияния систем удобрения на завершающую зернотравяной севооборот культуру — овес в 5-й ротации со следующим чередованием культур: однолетние травы, озимая рожь, ячмень, многолетние травы 2-х лет пользования, яровая пшеница и овес, полученные в 2015–2016 гг. Для сравнения использовали данные по действию систем удобрения на овес за 2008–2009 гг. в 4-й ротации севооборота с аналогичным чередованием культур [10].

Закладку и проведение опыта проводили по программе, разработанной методическим отделом ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова [11]. Схема опыта включала следующие варианты: 1 — контроль без внесения удобрений, 2 — навоз 9 т/га, 3 — минеральные удобрения $N_{90}P_{90}K_{90}$, 4 — $N_{30}P_{30}K_{30}$ + навоз 3 т/га, 5 — $N_{60}P_{60}K_{60}$ + навоз 6 т/га, 6 — $N_{90}P_{90}K_{90}$ + навоз 9 т/га, 7 — $N_{120}P_{120}K_{120}$ + навоз 12 т/га, 8 — $N_{150}P_{150}K_{150}$ + навоз 15 т/га.

В вариантах полевого опыта изучали эффективность последствий систем удобрений разной степени интенсивности, а именно: минеральных азотных, фосфорных и калийных удобрений, подстилочного навоза, а также комплексного применения минеральных удобрений в сочетании с навозом в возрастающих дозах: $N_{30}-150P_{30}-150K_{30}-150$ + навоз 3–15 т/га.

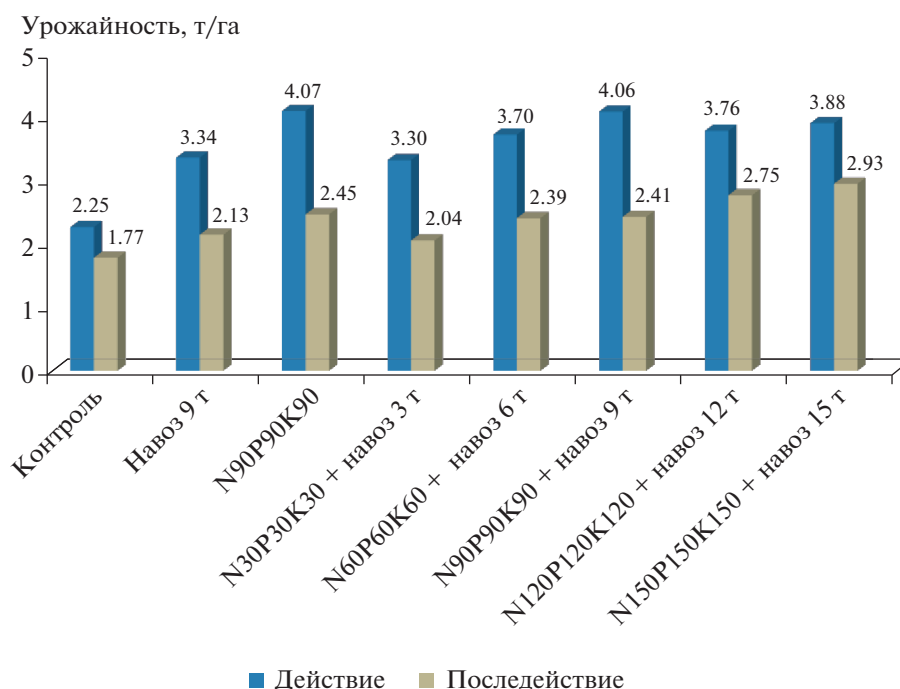


Рис. 1. Урожайность зерна овса в зависимости от действия ($HCP_{05} = 0.34$ т/га) и последействия ($HCP_{05} = 0.3$ т/га) систем удобрения разной интенсивности.

Почва опытного участка — дерново-подзолистая окультуренная легкосуглинистая имела следующие агрохимические показатели: pH 5.5, содержание гумуса — 1.3% С, подвижного фосфора (P_2O_5) по Кирсанову — 160, калия (K_2O) — 130 мг/кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости урожайности зерна овса сорта Скакун, возделываемого в 7-польном севообороте, при действии (при $HCP_{05} = 0.34$ т/га) и последействии (при $HCP_{05} = 0.3$ т/га) различных доз и сочетаний органических и минеральных удобрений представлены на рис. 1.

Высокие показатели урожайности зерна овса в зависимости от действия и последействия удобрений были достигнуты в вариантах органо-минеральных систем. При этом в действии удобрений максимальная урожайность овса (4.06 т/га, что на 80.2% больше контроля) отмечена в органо-минеральном варианте с 3-кратными дозами (N90P90K90 + навоз 9 т/га). Дальнейший рост доз навоза и минеральных удобрений до 4–5-кратных в органо-минеральных системах не сопровождался достоверным приростом урожайности зерна овса.

При анализе действия других систем удобрения установлено, что прибавка к контролю при применении органической системы (навоз 9 т/га)

ежегодно составила 48.3%, при минеральной системе (N90P90K90) — 80.9%, при внесении органо-минеральных систем в одно–трехкратных дозах прибавки урожая зерна овса варьировали от 46.0 до 80.2%.

При последействии удобрений наибольший эффект получен в варианте с органо-минеральной системы с более высокими, 4-кратными дозами (N120P120K120 + навоз 12 т/га), где урожайность зерна овса составила 2.75 т/га, или на 55.3% превышала контроль. В этом случае возрастание доз удобрений до 5-кратных (N150P150K150 + навоз 15 т/га) из-за полученной недостоверной прибавки урожая зерна овса оказалось нецелесообразным.

В последействии однократных доз удобрений в органо-минеральном варианте (N30P30K30 + навоз 3 т/га) урожайность зерна овса на легкосуглинистой почве в условиях промывного режима составляла всего 2.04 т/га, т.е. была существенно меньше по сравнению с последействием двукратных (N60P60K60 + навоз 6 т/га) и трехкратных (N90P90K90 + навоз 9 т/га) доз удобрений в органо-минеральных вариантах, где было получено зерна по ≈ 2.4 т/га.

При использовании минеральной системы удобрения (N90P90K90) в последействии урожайность зерна овса составила 2.45 т/га, т.е. фактическая разница с вариантом органо-минераль-

Таблица 1. Влияние действия и последствие систем удобрения на показатели качества зерна овса, %

Вариант	Сырой протеин	P ₂ O ₅	K ₂ O
Действие удобрений			
Контроль без удобрений	6.2	0.83	0.66
Навоз 9 т/га	8.4	0.85	0.68
N90P90K90	9.4	0.92	0.56
N30P30K30 + навоз 3 т/га	7.1	0.77	0.72
N60P60K60 + навоз 6 т/га	7.6	0.82	0.60
N90P90K90 + навоз 9 т/га	9.1	0.91	0.65
N120P120K120 + навоз 12 т/га	8.5	0.80	0.66
N150P150K150 + навоз 15 т/га	8.7	0.85	0.60
Последствие удобрений			
Контроль без удобрений	5.7	0.66	0.30
Навоз 9 т/га	10.4	0.69	0.35
N90P90K90	9.9	0.79	0.34
N30P30K30 + навоз 3 т/га	6.3	0.66	0.36
N60P60K60 + навоз 6 т/га	7.8	0.69	0.39
N90P90K90 + навоз 9 т/га	7.8	0.65	0.34
N120P120K120 + навоз 12 т/га	7.6	0.63	0.45
N150P150K150 + навоз 15 т/га	8.4	0.62	0.41

ной системы удобрения с трехкратными дозами (N90P90K90 + навоз 9 т/га) была недостоверной (при $HCP_{05} = 0.3$ т/га).

Последствие органической системы удобрения при внесении подстилочного навоза в ежегодной дозе 9 т/га в последствии обеспечивало урожайность овса 2.13 т/га, что существенно превышало контроль без удобрений.

В целом при последствии удобрений следует отметить, что все исследованные варианты систем, кроме органо-минеральной в одинарных дозах, обеспечивали достоверный рост урожайности зерна овса. Прибавка к контролю при применении органической системы составила 20.3, минеральной – 38.4%, в вариантах органо-минеральных систем в 2–5-кратных дозах прибавки варьировали от 35 до 65.5%.

Показатели урожайности овса в 4-й ротации севооборота, т.е. при действии удобрений были больше, чем в последствии во всех вариантах опыта. Например, если при действии удобрений они менялись от 46.4 до 80.2%, то при последствии – от 15.3 до 65.5% по отношению к контролю.

При комплексной оценке действия и последствия различных систем удобрения наряду с продуктивностью культур необходимо учитывать

их влияние на качество зерна, включая экологические показатели.

Согласно проведенному исследованию, с внесением удобрений в зерне овса повышалось содержание белка – с 6.2% в контроле до 7.6–9.4% в вариантах удобрения (табл. 1), в большей мере белковость зерна возрастала в варианте с минеральными удобрениями (до 9.4 при 6.2% в контроле) и в варианте с последствием подстилочного навоза (до 10.4 при 5.7% в контроле). Минеральная система удобрения (N90P90K90) повышала содержание фосфора в зерне с 0.83 до 0.92% при действии и с 0.66 до 0.79% при последствии удобрений. При внесении удобрений мало изменялось содержание в зерне калия.

При изучении массы 1000 зерен овса во время действия удобрений отмечено ее увеличение в вариантах органо-минеральных систем с 3–4-кратными дозами, где она составила 39.8–42.3 г. Достаточно высоким (38.7 г) этот показатель был в контроле. При последствии систем удобрения наибольшая масса 1000 зерен овса была достигнута в варианте с максимальными, 5-кратными дозами подстилочного навоза и минеральных удобрений, где она составила 31.8 г при 27.5 г в контроле (рис. 2). Применение одного органического удобрения – навоза 9 т/га фактически повышало массу 1000 зерен. Если рассматривать другие варианты, то следует отметить, что применение минеральной системы (N90P90K90) в последствии формировало зерно, которое по этому показателю не уступало органо-минеральным вариантам в 2–4-кратных дозах.

При комплексной оценке исследованных показателей, т.е. с учетом содержания биофильных элементов, эффективными при последствии следует считать практически все варианты систем удобрения. По содержанию сырого протеина при действии различных систем удобрения наиболее эффективными были все варианты, кроме органо-минерального с низкими дозами навоза и минеральных удобрений. Однако с учетом полученной прибавки урожайности приоритетным, несомненно, был вариант применения органо-минеральной системы в 3-кратных дозах (рис. 1).

Корреляционный анализ данных показал сильную связь между интенсивностью последствия удобрений и урожайностью овса ($r = 0.94$), а также между интенсивностью последствия удобрений и показателем 1000 зерен овса ($r = 0.85$). В то же время коэффициенты парной корреляции между урожайностью зерна овса и содержанием в нем фосфора и калия находились на более низком уровне: $r = 0.56$ и 0.71 соответственно.

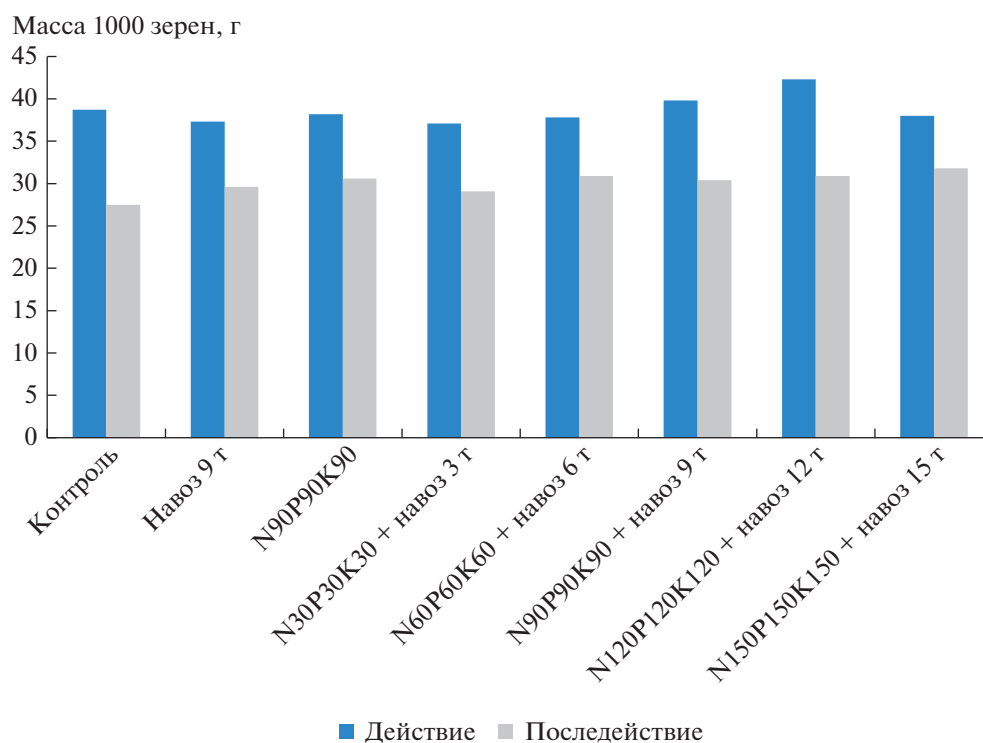


Рис. 2. Масса 1000 зерен овса в зависимости от действия и последействия систем удобрения разной интенсивности.

Полученные данные содержания тяжелых металлов и мышьяка в зерне овса позволили выявить следующие закономерности (табл. 2): наиболее интенсивно свинец, кадмий и мышьяк накапливались в зерне овса в варианте с последействием минеральной системы (N90P90K90) и в варианте с органо-минеральной системой в умеренных дозах (N90P90K90 + навоз 9 т/га). Меньше всего аккумулировалось тяжелых металлов и мышьяка в зерне овса в варианте с последействием органической системы удобрения при внесении навоза 9 т/га, но в этом случае была получена сравнительно небольшая прибавка урожайности зерна (20.3%). Прибавка урожайности зерна по отношению к контролю в варианте N90P90K90 более чем в 2 раза (на уровне 38.4%) превышала органический вариант (навоз 9 т/га) при содержании в зерне мышьяка в количестве 0.05 мг/кг и отличных показателях качества зерна по показателям массы 1000 семян и содержания белка. В целом содержание тяжелых металлов и мышьяка в зерне овса в вариантах исследованных систем удобрения отвечало экологическим требованиям, изложенным в Санитарных правилах СанПиН 2.3.2.1078-01 [12].

Анализ агрохимических свойств почвы в конце 5-й ротации севооборота показал целесообразность длительного применения систем удобре-

ния без риска загрязнить токсикантами растительную продукцию. Кислотность почвы в вариантах последействия навоза, минеральных удобрений и органо-минеральных систем с уме-

Таблица 2. Влияние последействия систем удобрения на содержание тяжелых металлов и мышьяка в зерне овса

Вариант	Содержание, мг/кг			
	Pb	Cd	Hg	As
Контроль без удобрений	0.06	<0.01	<0.005	<0.01
Навоз 9 т/га	0.06	<0.01	<0.005	<0.01
N90P90K90	0.17	0.03	<0.005	0.05
N30P30K30 + навоз 3 т/га	0.05	<0.01	<0.005	<0.01
N60P60K60 + навоз 6 т/га	0.08	<0.01	<0.005	<0.01
N90P90K90 + навоз 9 т/га	0.11	0.03	<0.005	<0.01
N120P120K120 + навоз 12 т/га	0.07	0.01	<0.005	<0.01
N150P150K150 + навоз 15 т/га	0.11	0.02	<0.005	0.02
Допустимые уровни, мг/кг [12]	0.50	0.10	0.030	0.20

ренными дозами повышалась с рН 5.1 в контроле до 5.4. Наименьшая величина рН 4.6 отмечена при последствии органо-минеральной системы удобрения в максимальных дозах (N150P150K150 + навоз 15 т/га). По содержанию гумуса в почве более высокие показатели были при последствии органо-минеральных систем удобрения в 4–5-пятикратных дозах (N120–150P120–150K120–150 + навоз 12–15 т/га), составившие 1.20 и 1.17% С соответственно при 0.93% С в контроле. В этих же вариантах отмечено улучшение фосфатного режима почвы: содержание подвижного фосфора (P_2O_5) в почве повысилось с 64 в контроле до 92 и 318 мг/кг соответственно. В то же время при последствии удобрений в вариантах систем не было отмечено четких закономерностей в содержании почвенного калия (K_2O).

ВЫВОДЫ

1. В условиях окультуренной легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы Нечерноземной зоны важным фактором повышения урожайности и качества зерна является рациональное применение органических и минеральных удобрений при оптимизации их доз и сочетаний. При этом установлено, что положительное влияние на продуктивность агроценозов овса оказывали системы удобрения как в действии, так и в последствии.

2. В длительном полевом опыте наименьшая урожайность зерна овса сорта Скакун, возделываемого в зернотравяном севообороте, составившая 1.8–2.1 т/га, получена в контроле, где удобрения не применяли. При действии примененных удобрений во всех вариантах был обеспечен достоверный рост урожайности зерна овса по отношению к контрольному варианту. Высокая урожайность качественного зерна овса – на уровне 4 т/га – формировалась в вариантах применения 3-кратных доз органо-минеральной (N90P90K90 + + навоз 9 т/га) и минеральной (N90P90K90) систем удобрения.

3. В последствии все исследованные варианты систем удобрения, кроме органо-минеральной системы в низких дозах, обеспечивали достоверный рост урожайности зерна овса по отношению к контролю. Прибавка урожайности зерна при органической системе составила 20.3, при минеральной – 38.4%, при применении органо-минеральных систем в 2–5-кратных дозах прибавки варьировали от 35.0 до 65.5%. Эффективное последствие органических и минеральных удобрений отмечено в органо-минеральном варианте с 4-кратными дозами (N120P120K120 + навоз

12 т/га), в котором урожайность зерна овса составила 2.75 т/га, или на 55.3% больше контроля без внесения удобрений. При этом получены высокие показатели качества зерна (массы 1000 семян (30.9 г), содержания белка (7.63%) и калия (0.45%)) при допустимом уровне содержания тяжелых металлов и мышьяка.

4. Корреляционный анализ опытных данных показал сильную связь между интенсивностью последствия удобрений и урожайностью зерна овса ($r = 0.94$), а также между интенсивностью последствия удобрений и показателем массы 1000 зерен овса ($r = 0.85$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспертно-аналитический центр агробизнеса “АБ-Центр”. www.ab-centre.ru. (Дата обращения – 15.02.2021).
2. Державин Л.М., Мерзлая Г.Е., Козлова А.В. Интегрированное применение средств химизации в ресурсосберегающих агротехнологиях производства зерна / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2016. 456 с.
3. Кудин В.В. Система удобрения. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 554 с.
4. Merzlaya H.Ye. Agrocenosis stabiliti during long-term applicftion of fertilizers on soddy-podzolic soil // Euras. Soil Sci. 2021. V. 54. № 3. P. 424–430.
5. Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями Российской Федерации / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2011. 372 с.
6. Кудяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
7. Слюсарь И.А., Силаева О.П., Бабурченкова З.П. Динамика показателей почвенного плодородия и использование средств химизации в Смоленской области // Достиж. науки и техн. АПК. 2018. № 4. С. 10–15.
8. Федулова А.Д., Мерзлая Г.Е., Постников Д.А., Гаврилова А.Ю. Агроэкологические аспекты последствия различных систем удобрения в условиях длительного полевого опыта на дерново-подзолистой почве // Достиж. науки и техн. АПК. 2018. № 9. С. 16–20.
9. Postnikov D.A., Merzlaya G.E., Fedulova A.D., Postnikova K.V. Comparative evaluation of the biological activity of the arable layer of sod–podzolic soil in the Non-chernozem zone (Smolensk region) defending on the fertilizer system // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. № 594. P. 012028.
10. Козлова А.В., Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Понкратенкова И.А. Урожайность и качество зерна овса при возделывании в севообороте и длительном применении органических и минеральных удобрений // Плодородие. 2014. № 1. С. 10–13.

11. Программа и методика исследований в Географической сети опытов по комплексному применению средств химизации в земледелии. М.: ВИАУ, 1990. 188 с.
12. Санитарные правила “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов”. СанПиН 2.3.2.1078-01.

Productivity and Quality of Oat Grain with Long-Term Use of Fertilizer Systems of Different Intensity

G. E. Merzlaya^{a, #}, A. D. Fedulova^a, and A. Y. Gavrilova^{b, ##}

^a D.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia

^b Federal Research Center for Bast Fiber Crops
ul. Nahimova 21, Smolensk 214025, Russia

[#] E-mail: lab.organic@mail.ru

^{##} E-mail: a.gavrilova.smi@mail.ru

In a long-term field experiment, established in 1978, the influence of mineral, organic and organo-mineral fertilizer systems of varying intensity in action and aftereffect on the yield and quality indicators of oat grain when cultivated in a field crop rotation on cultivated sod-podzolic light loamy soil of the Smolensk region was studied. A positive reliable effect of fertilizer systems on the productivity of oats of the Skakun variety has been established when optimizing doses and combinations of manure and mineral nitrogen, phosphorus and potash fertilizers both in action and in aftereffect (with the exception of the organo-mineral system in low doses). The lowest yield in the experiment of oat grain of the Skakun variety cultivated in the grain–grass crop rotation, amounting to 1.8–2.1 t/ha, was obtained in the control, where fertilizers were not used. In action, all the studied variants of fertilizer systems provided a reliable increase in the yield of oat grain relative to the control. High yield of oat grain with good quality (at the level of 4 t/ha) was formed when applying three-fold doses of organic-mineral (N90P90K90 + manure 9 t/ha) and mineral (N90P90K90) fertilizer systems. In the aftereffect of the cultivation of oats for grain, all fertilizer systems were effective, with the exception of the organo-mineral system in low doses. The increase in grain yield to control with the organic system was 20.3%, with the mineral system – 38.4%, with organo-mineral systems in 2–5-fold doses, the increases ranged from 35 to 65.5%. The effective aftereffect of organic and mineral fertilizers was noted when using an organo-mineral system with four-fold doses (N120P120K120 + manure 12 t/ha), when the yield of oat grain was 2.75 t/ha, which was 55.3% more than the control without fertilization. At the same time, high grain quality indicators were obtained (weight of 1000 seeds (30.9 g), protein content (7.63%) and potassium (0.45%) with a low content of heavy metals and arsenic in the grain.

Key words: fertilizer systems, action and aftereffect, oat yield, grain quality, protein, heavy metals, arsenic.

УДК 631.86.232.322.4

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ КАРТОФЕЛЯ В КОРМОВОМ СЕВООБОРОТЕ В ДЛИТЕЛЬНОМ ОПЫТЕ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА

© 2022 г. Н. Т. Чеботарев¹, О. В. Броварова^{1,*}

¹ Институт агробиотехнологий им. А.В. Журавского Коми НЦ УрО РАН
167023 Сыктывкар, ул. Ручейная, 27, Россия

*E-mail: olbrov@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 03.03.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В длительном стационарном опыте на дерново-подзолистой среднеоккультуренной почве изучена эффективность использования органических и минеральных удобрений, а также их сочетаний на плодородие почвы и продуктивность картофеля в кормовом 6-польном севообороте. Установлено, что комплексное применение удобрений наиболее значительно влияло на улучшение агрохимических свойств почвы и ее продуктивность. Увеличивалось содержание гумуса на 0.4–0.7%, подвижного фосфора – на 70–150 мг/кг, снижалась обменная и гидролитическая кислотности, а также количество обменного калия. Совместное использование органических и минеральных удобрений, особенно в высоких дозах, повышали урожайность и качество картофеля.

Ключевые слова: почва, кормовой севооборот, органические и минеральные удобрения, гумус, обменная кислотность, продуктивность, крахмал, нитраты.

DOI: 10.31857/S0002188122080038

ВВЕДЕНИЕ

Повышение продуктивности агроценозов Европейского Северо-Востока требует неотложного решения вопросов сохранения и повышения плодородия почв, сокращения материальных и энергетических затрат на производство сельскохозяйственной продукции. Для Республики Коми (РК) характерны прохладное и короткое лето, поздние весенние и ранние осенние заморозки, что ослабляет рост растений и снижает потребление питательных веществ [1]. На пахотных угодьях РК представлены в основном дерново-подзолистые почвы, для которых характерно очень низкое естественное плодородие [2]. При резком сокращении объемов применения удобрений и химических мелиорантов они быстро подвергаются деградационным процессам, что сопровождается снижением содержания почвенного органического вещества (ПОВ), питательных веществ и ухудшением физико-химических свойств. Для широкого воспроизводства продуктивности агроценозов РК требуются: совершенствование технологий

сохранения и воспроизводства плодородия почв; возделывание сельскохозяйственных культур, адаптированных к региональным почвенно-климатическим условиям [3, 4], переход от зональной системы земледелия к адаптивно-ландшафтному земледелию и биологизированному кормопроизводству [4–7].

В связи с недостаточными ресурсами органических удобрений и высокой стоимостью минеральных, в повышении плодородия почв возрастает роль севооборотов с высокой насыщенностью однолетними и многолетними травами, позволяющими без значительных затрат повышать продуктивность культур [8–11] при высоком качестве сельскохозяйственной продукции [12]. Наиболее полно изучить возможность применения таких севооборотов и оценить влияние внесимых доз удобрений на их продуктивность и качество продукции, рациональное использование материальных ресурсов и возмещение в почву элементов питания и органического вещества позволяют длительные полевые опыты [9, 13–15], один из которых, заложенный на землях Инсти-

тута агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, послужил основой для проведения данных исследований. Изучение применения органических и минеральных удобрений в кормовом севообороте проводится более чем 40 лет [4, 9]. Такой подход является важным резервом обеспечения воспроизводства плодородия и продуктивности дерново-подзолистых почв в адаптивно-ландшафтной системе земледелия Республики Коми, сохранения и поддержания его гумусового статуса.

Стационарные опыты являются главным источником информации при изучении фундаментальных проблем земледелия, а их результаты составляют основу стабильного эффективного земледелия. Основным элементом системы земледелия являются севообороты, что представляет основу для проведения всех агрономических мероприятий, в частности, систем обработки почвы, систем удобрения, систем борьбы с эрозией почвы, защиты посевов от сорняков, болезней и вредителей. В связи с этим цель работы — изучение влияния комплексного применения удобрений на плодородие пахотных почв, продуктивность и качество культур в 6-польном кормовом севообороте в условиях Севера и выявление закономерностей трансформации почв сельскохозяйственных угодий. В задачи исследования входили:

- оценка продуктивности картофеля — 6-го поля кормового севооборота, применения органических и минеральных удобрений, а также анализ качества растениеводческой продукции (картофеля), его соответствия нормативам (содержание сухого вещества, крахмала, витамина С, нитрат-ионов);
- оценка изменения агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы при выращивании картофеля в 6-польном кормовом севообороте;
- расчет рентабельности использования доз минеральных и органических удобрений в 6-польном кормовом севообороте для биоклиматических условий средней тайги Республики Коми.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексные исследования пахотных почв, их физико-химических особенностей продуктивности картофеля выполняли на землях Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, где, начиная с 1978 г., проводится долговременный полевой опыт с удобрениями в кормовом севообороте согласно методике ВИУА им. Д.Н. Прянишникова для Географической сети опытов с удобрениями [16]. Почва опытного участка — сильно-подзолистая легкосуглинистая на покровных суглинках. На начало эксперимента (1978 г.) содержание гумуса варьировало в пределах 2.1–2.5%, pH_{KCl} 4.8–5.6, сумма поглощенных оснований — 10.3–16.8 ммоль/100 г почвы, содержание подвижных форм фосфора — 180–240, калия — 146–190 мг/кг почвы.

В 1978–2019 гг. проводили изучение влияния различных доз минеральных удобрений (расчетной, 1/3 и 1/2 от расчетной) и действия 2-х доз органических удобрений (40 и 80 т/га) на плодородие дерново-подзолистой почвы, рост и развитие картофеля в 6-польном кормовом севообороте со следующим чередованием культур: картофель, однолетние травы + многолетние травы, многолетние травы 1-го года пользования, многолетние травы 2-го года пользования, однолетние травы, картофель. Органические удобрения (торфо-навозный компост (ТНК)) вносили осенью в период с 1977 по 2018 г. в чистом виде и на фоне действия минеральных удобрений. Также в 2018 г. для снижения обменной и гидролитической кислотности проведено известкование известняковой мукой по полной гидролитической кислотности (8.0 т/га). Расчетные дозы NPK под картофель на запланированный урожай (15.0 т/га) составили: N20P10K60 (1/3 дозы), N30P15K90 (1/2 дозы), N60P30K180 (полная расчетная доза). Площадь опытной делянки 100 м² (12.5 × 8), повторность опыта четырехкратная, площадь участка под опытом 4800 м².

Схема опыта, варианты:

1. Контроль без удобрений	5. ТНК 40 т/га (фон 1)	9. ТНК 80 т/га (фон 2)
2. N20P10K60 (1/3 NPK)	6. Фон 1 + 1/3 NPK	10. Фон 2 + 1/3 NPK
3. N30P15K90 (1/2 NPK)	7. Фон 1 + 1/2 NPK	11. Фон 2 + 1/2 NPK
4. N60P30K180 (1 NPK)	8. Фон 1 + 1 NPK	12. Фон 2 + 1 NPK

Полевые и лабораторные исследования: фенологические наблюдения в фазах развития растений, учет урожая картофеля в фазе начала отмирания ботвы, определение сухого вещества и кор-

мовых единиц (по результатам химического анализа растений) в урожае картофеля выполняли по методикам, принятым в агрохимической службе и почвоведении, расчет энергетической

эффективности удобрений — по рекомендациям [12, 17]. Отбор почвенных образцов в пахотном горизонте на опытных делянках проводили после уборки урожая клубней картофеля. Уборку клубней картофеля проводили в фазе полного созревания (на 90–95-е сут после посадки).

На станции химизации “Сыктывкарская” и Институте агробиотехнологий им. А.В. Журавского в клубнях картофеля определяли содержание сухого вещества высушиванием в термостате при 100–105°C, общего азота — индофенольным методом (ГОСТ 13496.4-85), нитратов — ионометрическим методом, крахмал — поляриметрическим методом по Эверсу, витамин С — по Мурри. В образцах почв определение величины рН водной и солевых вытяжек проводили ионометрическим методом, обменной кислотности — по Соколову. Содержание фосфора определяли колориметрическим методом по Кирсанову, калия — методом пламенной фотометрии, обменные катионы кальция и магния извлекали ацетатно-аммонийным буфером (рН 7.0) с последующим определением на атомно-эмиссионном спектрофотометре ICP-Spectro ciros. Содержание гумуса определяли по Тюрину, фракционно-групповой состав гумуса — методом Тюрина в модификации Пономаревой—Плотниковой [16].

Математическая обработка полученных данных выполнена методами дисперсионного анализа с использованием пакетов программ Microsoft Excel и Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение различных доз органических и минеральных удобрений и их совместное использование в длительном опыте оказало существенное влияние на агрохимические показатели дерново-подзолистой среднеоккультуренной почвы (табл. 1). Использование 3-х доз минеральных удобрений в течение длительного времени способствовало накоплению гумуса до 2.3–2.5, совместного применения ТНК 40 т/га + три дозы NPK — до 2.1–2.7, ТНК 80 т/га + три дозы NPK — до 2.3–3.6 и 2-х доз органических удобрений — до 2.4 и 2.8%. В контрольном варианте среднее содержание гумуса составило 1.9–2.1%. Накопление гумуса в почве происходило прежде всего за счет органических удобрений, а также корнепознанных остатков культур, особенно бобово-злаковых травосмесей и их трансформации под действием почвенных микроорганизмов.

Исходная кислотность почвы (1978 г.) составляла 4.8–5.6 ед. рН. В течение длительного времени удавалось сохранить обменную кислотность

на уровне 5.0–5.5 ед. рН, но к 2013 г. она повысилась до рН_{KCl} 4.4–4.8, поэтому в 2018 г. провели известкование опытного участка по полной гидролитической кислотности (8.0 т/га), что позволило снизить обменную кислотность до рН 5.3–6.8. Средняя обменная кислотность за годы исследования при применении 3-х доз NPK составила рН_{KCl} 5.1–5.2, 2-х доз ТНК — 5.2–5.3 ед. Применение 3-х доз NPK на фоне ТНК 40 т/га снижало обменную кислотность до рН_{KCl} 5.1–5.2, а на фоне ТНК 80 т/га она составила 5.3–5.5 ед. рН. Подобная закономерность отмечена и для гидролитической кислотности. Наименьшими ее показатели были в 2019 г. и составили при применении 3-х доз NPK на фоне ТНК 80 т/га 0.6–1.9 ммоль/100 г почвы.

Органические и минеральные удобрения, а также корнепознанные остатки растений и их трансформация под воздействием почвенных микроорганизмов способствовали накоплению в почве подвижного фосфора. Наиболее значительные количества подвижного фосфора накапливались при совместном применении органических и минеральных удобрений (180–470 мг/кг почвы), а также при использовании двух доз ТНК (201–402 мг/кг почвы). В варианте без удобрений его количество составило 165–220 мг/кг почвы.

Содержание обменного калия в почве увеличивалось в почве в меньшей степени, чем подвижного фосфора. Наименьшее его количество отмечено в 2013 г. (66–98 мг/кг почвы), но после проведения известкования в 2018 г. его объемы повысились до 105–136 мг/кг. Незначительное накопление обменного калия в почве объяснялось из-за его высокого выноса растениями и вымыванием по профилю почвы.

Исследования в течение 42 лет (7 ротаций севооборота за 1978–2019 гг.) показали высокую эффективность комплексного применения удобрений (табл. 2). Наибольшая средняя урожайность сухого вещества картофеля получена в варианте ТНК 80 т/га + 1 NPK и составила 5.6 т/га, что на 61.1% превышала контрольный вариант (3.6 т/га). В вариантах ТНК 80 т/га + 1/2 или 1/3 NPK урожайность была равна 5.3 и 5.6 т/га и на 55.6 и 47.2% превышала контроль. Минеральные удобрения в 3-х дозах увеличивали урожайность картофеля до 3.9–4.7 т/га (на 8.3–30.5% больше контроля). Использование 3-х доз NPK (1/3, 1/2 и 1.0) на фоне ТНК 40 т/га способствовали получению урожая клубней картофеля до 4.8–5.4 т/га (на 33.3–50.0% больше контроля).

Показано, что органические удобрения (варианты ТНК 40 т/га и 80 т/га) способствовали получению урожая картофеля 4.1 и 4.7 т/га (на 13.8 и

Таблица 1. Действие органических и минеральных удобрений на агрохимические свойства почвы (слой 0–20 см), (1978–2019 гг.)

Вариант	Гумус, %									H_r , ммоль/100 г почвы							
	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7	Сред- нее	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7
Без удобрений (контроль)	2.1	2.0	2.0	1.9	2.1	2.1	2.1	2.6	2.1	3.1	3.5	3.3	4.0	3.3	3.3	5.4	2.0
1/3 NPK	2.3	2.4	2.3	2.4	2.3	2.3	2.2	2.8	2.4	3.7	3.6	3.6	3.6	3.7	3.7	3.5	5.1
1/2 NPK	2.5	2.4	2.4	2.5	2.4	2.4	2.3	2.9	2.5	3.4	4.1	3.2	3.4	3.3	3.4	3.6	5.1
1 NPK	2.5	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.7	2.5	3.4	4.3	4.0	3.5	3.4	3.5	5.3	1.9
ТНК 40 т/га (фон 1)	2.5	2.6	2.5	2.6	2.7	2.8	2.7	2.8	2.6	3.7	3.4	3.5	3.4	3.3	3.2	4.8	2.2
Фон 1 + 1/3 NPK	2.4	2.6	2.4	2.5	2.6	2.7	2.6	2.6	2.5	3.7	3.3	3.2	3.3	3.4	3.3	5.0	1.7
Фон 1 + 1/2 NPK	2.4	2.6	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	2.8	2.6	3.4	3.3	3.2	3.3	3.2	3.1	5.1	2.1
Фон 1 + 1 NPK	2.1	2.6	2.5	2.6	2.6	2.7	2.5	3.0	2.6	4.2	3.6	3.7	3.6	3.8	3.9	4.9	2.1
ТНК 80 т/га (фон 2)	2.4	2.7	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8	3.5	2.8	3.8	3.4	3.5	3.4	3.6	3.7	4.6	2.0
Фон 2 + 1/3 NPK	2.0	2.7	2.6	2.6	2.5	2.6	2.4	3.6	2.6	3.9	2.9	3.3	3.4	3.6	3.7	4.8	1.9
Фон 2 + 1/2 NPK	2.6	2.7	2.6	2.7	2.7	2.9	2.9	3.1	2.8	4.4	3.2	3.4	3.5	3.7	3.8	4.6	0.7
Фон 2 + 1 NPK	2.3	2.7	2.7	2.6	2.8	3.0	2.6	3.2	2.7	3.6	3.3	3.4	3.5	3.3	3.5	4.7	0.6
HCP_{05}	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	—	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3
Вариант	pH_{KCl} , ед.									P_2O_5 , мг/кг почвы							
	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7	Сред- нее	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7
Без удобрений (контроль)	5.5	5.0	5.1	5.3	5.2	5.2	4.1	5.8	5.1	223	198	215	220	214	208	165	266
1/3 NPK	5.6	4.9	5.0	5.2	5.1	5.3	4.4	5.3	5.1	193	204	225	240	280	315	195	285
1/2 NPK	5.6	5.0	5.2	5.2	5.3	5.3	4.5	5.4	5.2	187	304	410	420	392	386	217	260
1 NPK	5.4	4.8	5.1	5.2	5.0	5.2	4.4	5.7	5.1	201	364	424	540	415	364	235	234
ТНК 40 т/га (фон 1)	5.2	5.3	5.2	5.3	5.3	5.4	4.5	5.5	5.2	211	234	288	310	344	402	187	309
Фон 1 + 1/3 NPK	5.3	5.0	5.1	5.3	5.4	5.5	4.4	5.8	5.2	211	262	335	360	392	421	204	332
Фон 1 + 1/2 NPK	5.2	4.9	5.1	5.2	5.4	5.5	4.5	5.9	5.2	246	317	443	490	412	392	242	443
Фон 1 + 1 NPK	4.8	5.0	5.0	5.1	5.2	5.3	4.6	5.7	5.1	184	218	437	680	425	369	254	314
ТНК 80 т/га (фон 2)	5.3	5.3	5.2	5.3	5.4	5.6	4.7	5.7	5.3	201	237	293	330	362	401	222	342
Фон 2 + 1/3 NPK	5.1	5.5	5.3	5.2	5.3	5.4	4.6	5.8	5.3	180	218	344	380	377	385	256	371
Фон 2 + 1/2 NPK	5.2	5.4	5.3	5.5	5.4	5.5	4.7	6.7	5.5	240	250	352	390	396	409	274	313
Фон 2 + 1 NPK	5.3	5.2	5.3	5.2	5.4	5.5	4.8	6.8	5.4	227	342	428	470	466	464	289	318
HCP_{05}	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	—	22	28	37	42	38	42	25	38
Вариант	K_2O , мг/кг почвы																
	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7									
Без удобрений (контроль)	146	142	134	130	121	96	46	119									
1/3 NPK	148	154	161	170	175	187	66	130									
1/2 NPK	152	196	212	290	223	212	70	132									
1 NPK	156	217	288	320	266	199	89	133									
ТНК 40 т/га (фон 1)	148	152	165	180	195	206	62	108									
Фон 1 + 1/3 NPK	162	182	218	240	231	218	70	111									
Фон 1 + 1/2 NPK	178	227	324	370	246	196	72	125									
Фон 1 + 1 NPK	181	230	318	360	320	211	81	106									
ТНК 80 т/га (фон 2)	170	190	194	210	203	192	67	129									
Фон 2 + 1/3 NPK	173	197	215	240	218	202	82	105									
Фон 2 + 1/2 NPK	185	216	233	270	253	212	87	116									
Фон 2 + 1 NPK	190	227	274	300	265	234	98	136									
HCP_{05}	18	22	27	32	25	22	7	13									

Примечание. В графе 0^{xx} — 1978 г., 1 — 1983 г., 2 — 1989 г., 3 — 1995 г., 4 — 2001 г., 5 — 2007 г., 6 — 2013 г., 7 — 2019 г. То же в табл. 2.

Таблица 2. Влияние комплексного применения органических и минеральных удобрений на продуктивность и качество картофеля (1978–2019 гг.)

Вариант	Урожайность сухого вещества, т/га									Прибавка к контролю, %
	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7	среднее	
Без удобрений (контроль)	3.6	3.0	3.6	0.6	3.2	3.3	4.3	4.3	3.6	—
1/3 NPK	4.6	4.1	5.3	1.2	3.4	3.5	4.4	4.7	3.9	8.3
1/2 NPK	5.0	4.6	5.6	1.7	4.1	4.5	4.7	5.3	4.4	22.2
1 NPK	5.4	4.9	5.8	2.1	4.3	4.7	5.1	5.7	4.7	30.5
ТНК 40 т/га (фон 1)	3.9	3.4	4.8	1.4	3.8	4.1	5.8	5.4	4.1	13.8
Фон 1 + 1/3 NPK	5.5	5.1	5.6	2.0	4.0	4.2	5.6	5.2	4.8	33.3
Фон 1 + 1/2 NPK	6.0	5.6	5.6	2.2	4.1	4.3	6.1	6.8	5.1	41.7
Фон 1 + 1 NPK	6.2	5.9	5.3	2.4	4.5	4.9	6.1	7.6	5.4	50.0
ТНК 80 т/га (фон 2)	4.1	4.1	5.5	1.7	4.2	4.5	7.1	6.2	4.7	30.5
Фон 2 + 1/3 NPK	5.9	5.5	6.0	2.4	4.4	4.6	6.8	6.9	5.3	47.2
Фон 2 + 1/2 NPK	6.0	5.8	6.2	2.5	4.5	4.7	6.8	7.7	5.6	55.5
Фон 2 + 1 NPK	6.3	6.0	6.9	2.8	4.7	4.8	7.0	8.1	5.6	55.6
НСП ₀₅	0.6	0.5	0.6	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	—	—

30.6% больше контроля). Наиболее низкие урожаи картофеля получены в 1995 г. и составили: ТНК 40 + 3 дозы NPK — 2.0–2.4, ТНК 80 т/га + 3 дозы NPK — 2.4–2.8, при использовании трех доз NPK — 1.2–2.1, органических удобрений (ТНК 40 и 80 т/га) — 1.4 и 1.7 т/га и в контроле — 0.6 т/га. Сложившиеся метеоусловия 1995 г. были крайне неблагоприятными для роста и развития растений картофеля (посадки были угнетены переувлажнением почвы в первую половину вегетационного периода, пониженной температурой воздуха в период клубнеобразования и оказали отрицательное влияние на урожайность клубней картофеля). В другие годы исследования резких отклонений от средних многолетних показателей количества осадков и температуры воздуха не наблюдали.

Содержание сухого вещества картофеля снижалось при повышении доз минеральных удобрений и составило 2–3%, что соответствовало другим исследованиям с удобрениями (табл. 3).

Содержание крахмала в клубнях картофеля значительно различалось в вариантах. При применении 3-х доз NPK среднее его количество было равно 12.7–13.5% (в контроле — 13.6%), двух доз органических удобрений (ТНК 40 и 80 т/га) его содержание было равно 13.1 и 13.3%. Применение NPK на фоне ТНК 40 т/га повышало количество крахмала в клубнях картофеля до 12.3–13.1%, использование доз NPK на фоне ТНК 80 т/га — до 12.4–12.7%. Так как крахмал является основным показателем качества картофеля, това-

ропроизводитель в зависимости от его содержания может использовать клубни картофеля для различных целей: диетического питания населения, спиртовой промышленности, питания животных и др. Витамин С также является важным показателем качества картофеля. Наибольшее его количество получено в вариантах совместного применения органических и минеральных удобрений — 18.5–25.5 мг%, минеральных удобрений — 16.9–21.8, органических удобрений — 17.5–21.6, в контроле — 18.4–20.8 мг%.

Нитратный азот принимает участие в питании растений, но при попадании в организм человека он трансформируется в нитритный азот (NO₂), что представляет большую опасность для здоровья человека. В наших исследованиях количество нитратного азота варьировало от 34 до 194 мг/кг сырой массы, но это не представляло опасности, т.к. ПДК составляет 500 мг/кг сырой массы.

ВЫВОДЫ

1. Комплексное длительное применение удобрений положительно влияло на содержание гумуса в почве. При применении NPK совместно с органическими удобрениями (ТНК) содержание гумуса повысилось до 2.5–2.8, только NPK — до 2.4–2.5%, при содержании гумуса в контроле 2.1%. Удобрения снижали обменную кислотность почвы наиболее значительно при использовании NPK и ТНК до pH_{KCl} 5.3–5.4, при pH_{KCl} в контроле равным 5.1. Подобная закономерность отмечена и для гидролитической кислотности.

Таблица 3. Влияние комплексного применения органических и минеральных удобрений на качество картофеля (1978–2019 гг.)

Вариант	Крахмал, %									Витамин С, мг%							
	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7	Сред- нее	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7
Без удобрений (контроль)	13.8	12.9	14.3	11.9	13.2	14.3	14.0	14.4	13.6	18.4	19.1	21.1	19.3	20.8	18.8	20.1	19.4
1/3 NPK	13.3	13.0	12.0	13.9	14.4	14.6	14.7	12.6	13.5	18.3	16.9	17.8	16.9	17.4	17.5	16.5	15.8
1/2 NPK	11.7	12.2	11.2	14.5	13.8	13.5	15.1	12.6	13.1	17.5	18.6	19.1	20.4	21.8	20.6	21.7	22.0
1 NPK	11.5	12.3	11.1	14.2	14.0	13.1	15.6	10.1	12.7	16.9	17.9	18.3	17.5	18.4	18.2	18.4	16.7
ТНК 40 т/га (фон 1)	13.1	12.7	13.1	13.0	13.2	13.6	15.7	11.7	13.3	17.5	18.6	18.2	19.4	18.8	19.6	19.2	17.6
Фон 1 + 1/3 NPK	11.8	12.4	12.1	13.3	13.4	13.7	16.0	12.1	13.1	21.4	20.5	19.8	21.5	21.7	21.8	22.7	24.6
Фон 1 + 1/2 NPK	11.6	12.6	11.3	12.7	12.9	13.4	16.2	11.2	12.7	19.6	20.7	21.1	20.8	21.6	20.9	21.6	22.0
Фон 1 + 1 NPK	10.7	11.4	11.6	12.5	12.6	12.5	16.5	10.3	12.3	21.3	21.7	22.0	21.7	22.0	22.6	22.3	21.1
ТНК 80 т/га (фон 2)	12.7	12.2	12.5	13.5	13.3	13.4	15.6	11.2	13.08	18.5	19.3	20.4	20.8	21.8	21.4	20.3	19.4
Фон 2 + 1/3 NPK	11.8	12.1	12.1	12.8	12.7	12.8	16.2	9.8	12.5	21.4	22.4	21.5	24.3	24.7	23.7	24.8	25.5
Фон 2 + 1/2 NPK	11.0	12.3	12.1	11.9	12.9	13.1	16.4	9.5	12.4	21.7	22.1	23.4	24.0	25.1	22.8	25.2	24.6
Фон 2 + 1 NPK	11.4	11.8	11.0	12.9	13.1	13.6	16.9	10.8	12.7	23.1	24.2	23.8	25.1	24.7	24.5	25.5	19.4
НСР ₀₅	1.17	1.24	1.15	1.27	1.33	1.37	1.62	1.05	—	1.75	1.85	1.92	2.14	1.88	1.95	2.25	2.45
Вариант	Нитраты, мг/кг сухой массы									Сухое вещество, %							
	0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7		0 ^{xx}	1	2	3	4	5	6	7
Без удобрений (контроль)	128	131	137	129	144	162	144	30		18.2	17.8	18.1	20.7	19.3	19.8	21.1	20.1
1/3 NPK	137	144	148	151	153	154	151	34		16.6	17.1	16.6	20.2	18.2	18.6	20.4	20.1
1/2 NPK	152	156	149	154	162	164	160	40		17.1	16.9	15.6	19.8	19.1	18.7	20.1	19.9
1 NPK	163	167	175	177	182	185	162	41		15.3	15.6	15.3	18.2	18.3	18.4	20.0	18.4
ТНК 40 т/га (фон 1)	132	137	141	131	143	139	146	40		17.2	16.9	17.8	18.7	18.2	18.7	22.1	19.2
Фон 1 + 1/3 NPK	135	142	139	142	151	138	155	42		16.7	16.5	15.8	17.7	18.2	18.9	20.1	18.1
Фон 1 + 1/2 NPK	165	151	172	174	173	180	168	54		15.3	15.5	14.8	17.5	17.9	18.4	21.1	18.3
Фон 1 + 1 NPK	167	170	174	169	174	172	175	75		15.4	15.7	15.3	17.4	18.1	18.3	19.9	17.8
ТНК 80 т/га (фон 2)	126	133	139	145	148	124	154	58		15.7	16.1	15.3	19.9	18.8	18.3	22.3	18.6
Фон 2 + 1/3 NPK	128	136	140	152	163	129	167	69		15.8	16.3	15.9	17.9	18.3	18.8	20.0	18.0
Фон 2 + 1/2 NPK	155	162	158	166	177	164	180	105		15.8	16.4	16.0	17.6	18.1	18.7	19.8	18.2
Фон 2 + 1 NPK	160	166	173	181	179	161	194	91		16.0	15.9	15.5	17.1	17.8	18.2	19.5	18.7
НСР ₀₅	16.4	15.1	14.2	1.66	1.73	1.65	1.55	5.4		1.73	1.68	1.53	1.78	1.85	1.87	2.10	1.84

2. Содержание подвижного фосфора в почве значительно увеличивалось, особенно при совместном применении органических и минеральных удобрений и использовании ТНК (до 180–402 мг/кг почвы). Содержание обменного калия в почве изменялось в незначительной степени, и его количество составляло 70–300 мг/кг в различных вариантах опыта из-за высокого его выноса растениями и вымыванием по профилю почвы.

3. Исследования в течении 42 лет (7 ротаций севооборота) показали высокую эффективность комплексного применения удобрений. Наиболь-

шая средняя урожайность сухого вещества картофеля получена в варианте ТНК 80 т/га + 1 NPK и составила 5.8 т/га, что на 61.1% превышало контроль. Минеральные удобрения повышали урожайность картофеля до 3.9–4.7 т/га (на 8.3–30.5% больше контроля), органические – до 4.1–4.7 т/га (на 13.9 и 30.6% больше контроля).

4. С увеличением доз минеральных удобрений снижалось содержание сухого вещества в клубнях на 2–3%. По количеству крахмала в картофеле различия были незначительными: при использовании минеральных удобрений – 12.7–13.5%

(в контроле — 13.6%), органических удобрений — 13.1 и 13.3%, НРК совместно с органическими удобрениями — 12.4–13.1%. Количество витамина С в клубнях картофеля было достаточно высоким — 16.9–25.5 мг%. Содержание нитратного азота не превышало ПДК (ПДК = 500 мг/кг сухой массы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заболоцкая Т.Г., Юдинцева И.И., Кононеко А.В.* Северный подзол и удобрения. Сыктывкар, 1978. 94 с.
2. *Забоева И.В.* Почвы и земельные ресурсы Коми АССР / Под ред. Герасимова И.П. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1975. 344 с.
3. *Заболоцкая Т.Г.* Биологический круговорот элементов в агроценозах и их продуктивность. Л.: Наука, 1985. 179 с.
4. *Чеботарев Н.Т.* Об эффективности использования удобрений при возделывании кормовых культур в условиях Республики Коми // Кормопроизводство. 2012. № 8. С. 32–33.
5. *Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Козлова А.В., Макшакова О.В., Волошин С.П., Хромова О.М., Панкратенкова И.В.* Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Агрохимия. 2012. № 2. С. 37–46.
6. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Овчинникова М.Ф.* Плодородие и биологическая активность дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений и их последствии // Агрохимия. 2004. № 7. С. 5–10.
7. *Лапа В.В., Босак В.Н., Пироговская Г.В.* Влияние органо-минеральной системы удобрения на продуктивность севооборотов и баланс гумуса в дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2009. № 2. С. 40–44.
8. *Измestьев В.М., Свечников А.К.* Влияние длительного применения минеральных удобрений на продуктивность кормовых севооборотов // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 1(44). С. 29–34.
9. *Чеботарев Н.Т., Юдин А.А.* Динамика плодородия и продуктивности дерново-подзолистой почвы под действием длительного применения удобрений в условиях Республики Коми // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 2. С. 11–13.
10. *Чеботарев Н.Т., Шморгунов Г.Т., Лантева Е.М., Ермолина В.И., Кормановская В.М.* Влияние длительного применения удобрений на содержание, фракционный состав и баланс гумуса в дерново-подзолистых почвах Европейского Северо-Востока // Агрохимия. 2009. № 10. С. 11–16.
11. *Бакина Л.Г., Дричко В.Ф., Небольсина З.П.* Влияние известкования на изменение состава гумуса дерново-подзолистых почв в зависимости от химических свойств их гуминовых кислот // Агрохимия. 2012. № 1. С. 14–23.
12. *Мухамадьяров Ф.Ф., Фигурин В.А., Ашихмин В.П., Коробицин С.Л., Кокурин Т.П., Халтурин В.С., Кодочигова В.В., Плетнев Н.А.* Методическое пособие по определению энергетизатор при производстве продовольственных ресурсов и кормов для условий Северо-Востока европейской части Российской Федерации. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1997. 62 с.
13. *Dymov A.A., Dubrovskiy Y.A., Startsev V.V.* Postagrogenic development of Retisols in the middle taiga subzone of European Russia (Komi Republic) // Land Degradat. Develop. 2018. V. 29. № 3. P. 495–505.
14. *Соколов А.В.* Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
15. *Воробьева Л.А.* Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
16. *Пономарева В.В., Плотникова Т.А.* Гумус и почвообразование / Под ред. Орлова Д.С. Л.: Наука, 1980. 222 с.
17. *Шоба С.А.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Effect of Systematic Application of Organic and Mineral Fertilizers on Agrochemical Properties of Sod-Podzolic Soil and Potato Productivity in Fodder Crop Rotation in the Long-Term Experience of the European North

N. T. Chebotarev^a and O. V. Brovarova^{a, #}

^a A.V. Zhuravsky Institute of Agrobiotechnology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS
ul. Rucheynaya 27, Syktyvkar 167023, Russia

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

In a long-term stationary experiment on sod-podzolic medium-cultivated soil, the effectiveness of the use of organic and mineral fertilizers, as well as their combinations on soil fertility and potato productivity in a feed 6-pole crop rotation was studied. It was found that the complex application of fertilizers most significantly affected the improvement of agrochemical properties of the soil and its productivity. The content of humus increased by 0.4–0.7%, mobile phosphorus — by 70–150 mg/kg, exchange and hydrolytic acidity decreased, as well as the amount of exchangeable potassium. The combined use of organic and mineral fertilizers, especially in high doses, increased the yield and quality of potatoes.

Key words: soil, fodder crop rotation, organic and mineral fertilizers, humus, exchange acidity, productivity, starch, nitrates.

УДК 631.8:631.559:633.521:631.582

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ УДОБРЕННОСТИ НА УРОЖАЙНОСТЬ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА И КУЛЬТУР ЛЬНЯНОГО СЕВООБОРОТА¹

© 2022 г. Н. Н. Кузьменко

Федеральный научный центр лубяных культур
172002 Торжок, Тверская обл., ул. Луначарского, 35, Россия
E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.2022 г.

После доработки 28.03.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В Центральном районе Нечерноземной зоны России в 2012–2018 гг. на дерново-подзолистой легко-суглинистой почве с низким содержанием гумуса, повышенным содержанием подвижного фосфора и среднем калия в 7-польном льняном севообороте изучили эффективность 3-х уровней удобрений при минеральной системе удобрения. Показано, что при возделывании льна-долгунца в севообороте после многолетних трав максимальную урожайность льносоломы 67.1 ц/га с номером 3.00 и урожайность льносемян 11.1 ц/га обеспечила доза N15P25K65. Для возделываемых в севообороте культур (озимая рожь, ячмень, овес и многолетние травы) и в целом для севооборота оптимальным уровнем удобрений было применение среднегодовой дозы N38P26.4K69.3 (за ротацию севооборота в сумме N265P185K485). Среднегодовая продуктивность севооборота составила 41.1 ц з.е./га при окупаемости 1 кг NPK прибавкой продуктивности в размере 13.8 кг з.е. Применение среднегодовой дозы N31P21.4K56.4 (в сумме N315P220K590) привело к снижению среднегодовой продуктивности севооборота на 6.2 ц з.е./га (на 15.1%) и снижению окупаемости удобрений на 6.1 кг з.е. (в 1.8 раза).

Ключевые слова: уровень удобрений, лен-долгунец, льняной севооборот, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188122080105

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности сельскохозяйственного производства в значительной мере определяется научно-обоснованным применением минеральных удобрений, обеспечивающим сбалансированность питания сельскохозяйственных культур при надлежащем выполнении других агротехнических приемов [1].

В условиях острого дефицита удобрений важно определить оптимальные дозы удобрений, обеспечивающие максимальную их оплату дополнительным урожаем продукции, снижение затрат на их применение и эффективное использование достигнутого потенциала почвенного плодородия. Рекомендуются дифференцированно подходить к применению минеральных удобрений с учетом достигнутого уровня содержания их в почве [2]. Научные исследования, проведенные

на льне-долгунце, показали, что при его возделывании на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с содержанием подвижного фосфора от повышенного до очень высокого и средним содержанием калия возможно снижение дозы фосфорных удобрений при основном внесении в 4.1 раза, калия – в 1.4 раза без снижения урожайности [3].

При разработке системы удобрения в севообороте важно определить оптимальную насыщенность севооборота органическими и минеральными удобрениями, обеспечивающую сохранение плодородия почвы, создание оптимальных условий почвенного питания и получение высоких и устойчивых урожаев всех культур севооборота. Для того чтобы сохранить исходный уровень плодородия, как правило, требуются более высокие дозы удобрений, но с экономической точки зрения они не всегда оправдываются [4–6]. Например, применение в льняном севообороте удобрений из расчета 360–370 кг д.в./га севооборотной площади способствует сохранению пло-

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Федерального научного центра лубяных культур (№ FGSS-2019-0017).

Таблица 1. Дозы минеральных удобрений под культуры севооборота, кг д.в./га

Культура	Уровень удобренности, NPK		
	низкий	средний	повышенный
Озимая рожь	75–30–65	90–40–80	105–50–95
Многолетние травы 1-го года пользования	0–25–80	0–30–100	0–35–120
Многолетние травы 2-го года пользования	0–25–80	0–30–100	0–35–120
Лен-долгунец	10–20–50	15–25–65	20–30–75
Ячмень	65–25–60	80–30–70	95–35–90
Овес	65–25–60	80–30–70	95–35–90
Внесено за севооборот	215–150–395	265–185–485	315–220–590
На 1 га севооборотной площади	31–21.4–56.4	38–26.4–69	45–31.4–84

дородия дерново-подзолистой почвы, но не обеспечивает существенного роста продуктивности в сравнении с дозой 200 кг д.в./га и приводит к снижению качества продукции [5].

Цель работы — выявление оптимального уровня удобренности льняного севооборота при минеральной системе удобрения, обеспечивающей максимальную урожайность льнопродукции с хорошим качеством и высокую продуктивность севооборота на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в условиях Центрального района Нечерноземной зоны России.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели в стационарном опыте ФНЦ ЛК в Тверской обл. в 2012–2018 гг. на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в севообороте со следующим чередованием культур: пар чистый — озимая рожь с подсевом многолетних трав (клевер красный и тимopheевка) — многолетние травы 1-го года пользования — многолетние травы 2-го года пользования — лен-долгунец — ячмень — овес.

В севообороте изучали 3 уровня удобренности: низкий — N31P21.4K56.4, средний — N38P26.4K69, повышенный — N45P31.4K84. Варианты систем удобрения и дозы удобрений под культуры севооборота представлены в табл. 1. В качестве контрольного варианта использовали вариант без внесения удобрений.

Почва перед закладкой эксперимента характеризовалась следующими агрохимическими показателями: pH_{KCl} 4.4, P_2O_5 по Кирсанову — 131, K_2O — 91 мг/кг, содержание гумуса по Тюрину — 1.10%. Общая площадь делянки в опыте составляла 72 м², учетная — 36 м², повторность трехкратная.

Использовали следующие виды минеральных удобрений: N_{аа}, P_с (N6P26) и K_х. Удобрения вно-

сили вразброс вручную под первую весеннюю культивацию. В опыте возделывали районированные в Тверской обл. сорта в соответствии с рекомендованной технологией для Нечерноземной зоны России с максимальным использованием серийных машин и оборудования. Учет урожая осуществляли поделочно, сплошным методом, с приведением его к стандартной влажности и чистоте. Урожайные данные обработаны методом дисперсионного анализа. Наблюдения и исследования в опыте, химические анализы почвы осуществляли в соответствии с методическими указаниями [7–9] и ГОСТ 26204-84-ГОСТ 26213-84 [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определяющим фактором в формировании урожайности льнопродукции является высота растений. Проведенные в опыте наблюдения показали, что наибольшая высота растений льна на протяжении всего периода вегетации отмечена при среднем уровне удобренности, что соответствовало дозе удобрения под лен N15P25K65. В фазе цветения высота растений в этом варианте составила 79.2 см, прирост высоты по отношению к неудобренному варианту был равен 10.3 см. Повышение дозы удобрения приводило к снижению высоты растений, при этом воздушно-сухая масса растений увеличивалась. Она была наибольшей (57.2 г/100 растений) и сформировалась при повышенном уровне удобренности, что соответствовало дозе N20P30K75, что было на 20.8 г больше, чем в контрольном варианте (табл. 2).

Погодные условия при возделывании льна-долгунца были благоприятными, что позволило даже в контрольном варианте без внесения удобрений получить высокую урожайность: льносоломой — 43.8 и льносемян — 9.4 ц/га. Наибольшую прибавку урожая льносоломой в размере 23.3 ц/га получили при среднем уровне удобренности при

Таблица 2. Влияние уровня удобрения льна-долгунца на формирование высоты растений и накопление воздушно-сухой массы

Уровень удобрения	Высота растений, см			Воздушно-сухая масса, г/100 растений		
	“елочка”	быстрый рост	цветение	“елочка”	быстрый рост	цветение
Без удобрения	6.9	28.7	68.9	2.4	8.5	36.4
Низкий	10.4	38.1	76.4	4.9	14.7	50.1
Средний	12.5	43.1	79.2	5.8	13.2	54.6
Повышенный	12.1	40.8	76.9	5.2	16.1	57.2

Таблица 3. Влияние уровня удобрения на урожайность и качество льнопродукции

Уровень удобренности	Урожайность, ц/га			Показатели инструментальной оценки качества льносоломы				
	льно- солома	льно- семена	горстевая длина, см	содержание луба, %	прочность, кгс	общий показатель качества	номер по ГОСТ	интерполи- рованный номер
Без удобрения	43.8	9.4	76	35	39	140	2.50	2.69
Низкий	63.5	12.1	80	33	45	138	2.50	2.88
Средний	67.1	11.1	81	36	45	143	3.00	3.19
Повышенный	58.5	10.9	82	34	45	140	3.00	3.00
<i>HCP</i> ₀₅	13	1.8						

дозе удобрения N15P25K65. Качество льносолом в этом варианте за счет наиболее высокого содержания луба (36%) было самым высоким с интерполированным номером 3.19 ед. (табл. 3).

Применение повышенной дозы удобрения N20P30K75 на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с повышенным содержанием подвижного фосфора и средним калия привело к снижению урожайности льносолом на 12.8% (на 8.6 ц/га) в сравнении со средней дозой. При самой низкой дозе удобрения N10P20K50 снижение урожая льносолом было меньше (на 5.4% или на 3.6 ц/га), но при этом снизилось качество солом на 1 сортономер с 3.00 до 2.50.

Урожайность льносемян в опыте была высокой — 9.4 ц/га в контрольном варианте и 10.9–12.1 ц/га — в удобренных. При этом отмечена четкая закономерность снижения семенной продуктивности льна с повышением уровня удобрения с 12.1 до 10.9 ц/га или на 8.3 и 9.9% соответственно.

Окупаемость минеральных удобрений на льне прибавкой основной продукции снижалась по мере увеличения доз удобрений: с 2.5 до 2.1 и 1.2 кг/кг соответственно.

На других культурах севооборота эффективность примененных удобрений была также достаточно высокой. При этом прослежена четкая закономерность получения максимальной урожай-

ности при среднем уровне удобрения севооборота — N38P26,4K69. Урожайность ячменя при низком уровне снизилась на 5.3, озимой ржи — на 16.7%. При повышенном уровне удобрения урожайность снижалась в большей степени: озимой ржи — на 10.2 многолетних трав 1-го года пользования — на 18.8%. Наибольшее снижение урожайности отметили для овса — на 31.0% при низком уровне удобрения и на 36.6% при повышенном уровне (табл. 4). Достоверное снижение урожайности при повышенном уровне удобрения отметили для 3-х культур севооборота: многолетних трав 1-го года пользования при применении удобрений в дозе N0P35K120, а также ячменя и овса при применении N95P35K90.

Установлены оптимальные дозы минеральных удобрений для культур льняного севооборота при возделывании на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с повышенным содержанием подвижного фосфора и средним калия: для озимой ржи — N90P40K80, для многолетних трав — N0P30K100, для льна-долгунца — N15P25K65, для ячменя и овса — N80P30K70.

Наиболее высокая продуктивность севооборота — 41.1 ц з.е./га и самая высокая окупаемость удобрений прибавкой продуктивности — 13.8 кг з.е. получена при среднем уровне удобрения. Суммарная доза удобрений за ротацию составила

Таблица 4. Урожайность культур льняного севооборота при применении различных доз удобрений, ц/га

Уровень удобренности	Озимая рожь	Многолетние травы 1-го года пользования	Многолетние травы 2-го года пользования	Ячмень	Овес
Без удобрения	13.2	35.9	34.6	19.5	15.5
Низкий	22.9	60.8	62.9	38.2	20.3
Средний	27.5	65.3	66.4	41.8	32.0
Повышенный	24.7	53.0	58.4	37.1	22.0
HCP_{05}	3.5	2.6	$F_{\phi} < F_{05}$	2.5	3.6

Таблица 5. Влияние насыщенности удобрениями на продуктивность севооборота и окупаемость 1 кг NPK

Уровень удобрённости	Внесено NPK, кг д.в./га севооборотной площади	Продуктивность севооборота, ц з.е./га	Окупаемость 1 кг NPK прибавками продуктивности севооборота, кг з.е.
Без удобрения	0	22.7	—
Низкий	31–21.4–56.4	36.0	12.5
Средний	38–26.4–69	41.1	13.8
Повышенный	45–31.4–84Ф	34.9	7.7

N265P185K485, среднегодовая доза — N38P26.4K69. При низком уровне удобрённости (среднегодовая доза N31P21.4K56.4) продуктивность севооборота снизилась на 12.4%, при повышенном (N45P31.4K84) — на 15.1% в сравнении со средним уровнем (табл. 1, 5).

Полученные данные согласовались с результатами других экспериментов, показавшие, что использование агротехнологий с высоким уровнем применения удобрений на почвах легкого гранулометрического состава с низким содержанием физической глины и органического вещества не обеспечивало существенного роста урожайности культур льняного севооборота [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с повышенным содержанием подвижного фосфора и средним калия показали, что при возделывании льна-долгунца в севообороте после многолетних трав с урожайностью сена на уровне 60 ц/га оптимальной дозой удобрения является N15P25K65. Урожайность льносоломы составила 67.1 ц/га, оцененной номером 3.00, урожайность льносемян — 11.1 ц/га. Применение повышенной дозы удобрения N20P30K75 привело к снижению урожайности льносоломы на 12.8% в сравнении с оптимальной без снижения ее качества. Меньшая доза удобрения N10P20K50 обеспечивала наибо-

лее высокую семенную продуктивность — 12.1 ц/га, но привела к снижению урожайности льносоломы на 5.4% и его качества на 1 сортономер.

Наиболее высокую продуктивность 7-польного льняного севооборота — 41.1 ц з.е./га обеспечило применение среднегодовой дозы N38P26.4K69 (за ротацию в сумме N265P185K485). Окупаемость 1 кг NPK прибавкой продуктивности составила 13.8 кг з.е.

Повышение уровня удобрённости до N45P31.4K84 на легкосуглинистой почве с низким содержанием органического вещества привело к снижению среднегодовой продуктивности севооборота на 6.2 ц з.е./га (на 15.1%) и снижению окупаемости удобрений на 6.1 кг з.е. (в 1.8 раза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллова Г.Б., Жуков Ю.П. Продуктивность культур севооборота при различных дозах удобрений на дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2004. № 1. С. 65–70.
2. Жуков Ю.П., Чухина О.В., Токарева Н.В., Куликова Е.И. Влияние различных доз удобрений на урожайность культур севооборота и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // Плодородие. 2015. № 2. С. 14–20.
3. Кузьменко Н.Н. Сравнительная эффективности разных доз удобрений при возделывании льна-долгунца // Юбилей сб. научн. тр. XIII Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 90-летию Донского гос. техн. ун-та (Ростовского-на-Дону ин-та

- сельхозмашиностроения), в рамках XXIII Агро-промышл. форума юга России и выставки “Инте-рагромаш”. В 2-х т. 2020 С. 633–636.
<https://doi.org/10.23947/interagro.2020.1.633-636>
4. Kosolapova A., Yamaltdinova V., Mitrofanova E., Fomin D., Teterlev I. Yields of field crops and sod-podzolic soil fertility of West Ural depending on fertilizer system // *Bulgar. J. Agricult. Sci.* 2016. V. 22. № 3. P. 381–385.
 5. Кузьменко Н.Н. Оценка эффективности разной насыщенности льняного севооборота удобрениями // *Плодородие*. 2020. № 2(113). С. 6–9. DOI: 10.25680/S19948603.2020.113.02
 6. Белоусов Н.М., Драганская М.Г., Бельченко С.А. Изменение параметров плодородия песчаных почв в результате длительного применения удобрений // *Результаты длительных исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями (К 70-летию Геосети)*. Вып. 1. М., 2011. С. 95–103.
 7. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. М.: ВАСХНИЛ, 1986. 146 с.
 8. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 415 с.
 9. Методические указания по проведению полевых опытов со льном-долгунцом. Торжок: Ржевская типография, 1979. 71 с.
 10. ГОСТ 26204-84-ГОСТ 26213-84. Почвы. Методы анализа. М.: Изд-во стандартов, 1984. 54 с.

Effect of Different Levels of Fertilization on the Yield of Flax and Crops Flax Crop Rotation

N. N. Kuzmenko

*Federal Scientific Center of Bast Crops
 ul. Lunacharskogo 35, Tver region, Torzhok 172002, Russia
 E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru*

In the Central region of the Non-Chernozem zone of Russia in 2012–2018, on sod-podzolic light loamy soil with low humus content, increased content of mobile phosphorus and average potassium in a 7-full flax crop rotation, the effectiveness of 3 levels of fertilization with a mineral fertilizer system was studied. It is shown that when cultivating flax in crop rotation after perennial grasses, the maximum yield of flax straw is 67.1 c/ha with the number 3.00 and the yield of flax seeds is 11.1 c/ha was provided by a dose of N15P25K65. For crops cultivated in crop rotation (winter rye, barley, oats and perennial grasses) and in general for crop rotation, the optimal level of fertilization was the use of an average annual dose of N38P26.4K69.3 (for rotation of crop rotation in the amount of N265P185K485). The average annual productivity of crop rotation was 41.1 c f.u./ha with a payback of 1 kg of NPK with an increase in productivity of 13.8 kg f.u. The use of an average annual dose of N31P21.4K56.4 (in the amount of N315P220K590) led to a decrease in the average annual productivity of crop rotation by 6.2 c f.u./ha (by 15.1%) and a decrease in the payback of fertilizers by 6.1 kg f.u. (1.8 times).

Key words: fertilization level, flax, flax crop rotation, productivity.

УДК 631.811.98:633.11:633.413:58.036.5

ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ БИОСТИМУЛЯТОРОВ НА ХОЛОДОСТОЙКОСТЬ ПШЕНИЦЫ И САХАРНОЙ СВЕКЛЫ¹

© 2022 г. А. О. Гранкина¹, Е. А. Бочарникова¹, В. В. Матыченков^{1,*}

¹ Федеральный исследовательский центр “Пушкинский научный центр биологических исследований РАН” –
Институт фундаментальных проблем биологии РАН
142290 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: vvmatichenkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В вегетационном эксперименте изучено влияние жидкого и твердого кремнийсодержащих препаратов на адаптацию растений пшеницы и сахарной свеклы к кратковременному действию низких температур. Кремниевые препараты применяли для опрыскивания растений в дозах 2 и 5 кг Si/га. В отсутствие холодового стресса обработка кремниевыми препаратами увеличила массу корней и надземных органов пшеницы на 27–54 и 13–39%, сахарной свеклы – на 11–33 и на 5–22% соответственно. Применение кремниевых препаратов в условиях низкотемпературного стресса обеспечило увеличение массы корней и надземных органов пшеницы на 33–55 и 14–28%, сахарной свеклы – на 22–44 и на 7–19% соответственно. Оба препарата способствовали усилению активности антиоксидантных ферментов (аскорбатпероксидазы, глутатионредуктазы и гваякол-пероксидазы) и ингибировали интенсивность процессов перекисного окисления липидов. Использование кремниевых препаратов также существенно повысило содержание фотосинтетических пигментов как в отсутствии, так и в условиях низкотемпературного стресса. Полученные данные позволили отнести испытанные препараты к эффективным биостимуляторам и свидетельствовали о перспективности их применения с целью повышения устойчивости растений пшеницы и сахарной свеклы к низкотемпературному стрессу.

Ключевые слова: кремнийсодержащие биостимуляторы, холодостойкость растений, пшеница, сахарная свекла.

DOI: 10.31857/S0002188122080075

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие значительно возросло использование различных видов биостимуляторов роста растений [1]. К данной группе относятся вещества, которые способны улучшать рост и продуктивность растений, качество урожая, устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам [2]. В отличие от гормонов и биорегуляторов, биостимуляторы влияют на скорость процессов метаболизма растений, не изменяя при этом конечные продукты биохимических реакций [1]. Важно, что эффективность биостимуляторов проявляется при малых дозах. Дозы биостимуляторов в среднем составляют от нескольких сотен граммов на гектар и не превышают нескольких килограммов на гектар [2].

Для эффективного использования биостимуляторов необходимо понимание механизмов, лежащих в основе их действия на развитие и жизне-

способность растений. В условиях стрессов различной природы происходит усиление синтеза активных форм кислорода (АФК), что является неспецифической реакцией растения на действие любого стресс-фактора [3]. В результате нарушается баланс между активностью антиоксидантной системы растений и интенсивностью процессов окислительной деструкции, что приводит к повреждению метаболически важных соединений и органелл. Антиоксидантная система растений включает комплекс ферментов и низкомолекулярных соединений, таких как аскорбиновая кислота, глутатион, токоферолы и другие, которые являются восстановителями и могут снижать содержание АФК [1, 3]. Поддержание баланса между окислительными и восстановительными процессами является ключевым для защиты растений в условиях стресса. В ряде работ было показано, что биостимуляторы непосредственно участвуют в регулировании окислительно-восстановительного баланса растений [1].

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, темы № 117030110139-9 и 121040800103-6 и договора АПТ-ЦИ-2020-04 с АО “Апатит”.

Хотя кремний не относят к необходимым элементам питания растений, многие сельскохозяйственные растения поглощают его в больших количествах, чем азот, фосфор или калий [4]. Начало изучения кремниевых удобрений относится к работам Ю. Либиха 1840 г. До начала XX века кремниевые удобрения исследовали совместно с азотными, фосфорными и калийными препаратами. Однако количество работ, посвященных изучению кремния в сельском хозяйстве, заметно сократилось после появления пестицидов [5].

Многочисленные современные исследования свидетельствуют, что активные формы кремния положительно влияют на рост растений и устойчивость к стрессам различной природы [6, 7]. Известно несколько кремний-опосредованных механизмов, обеспечивающих защиту растений в условиях стресса: 1 — механическая защита благодаря аккумуляции Si в эпидермальных тканях и образованию двойного кремний-эпидермального слоя, препятствующего атакам насекомых-вредителей и развитию грибковых заболеваний [8]; 2 — физиологическая защита за счет улучшения развития корневой системы и усиления фотосинтеза [9]; 3 — химическая защита посредством химического взаимодействия между монокремниевой кислотой и токсичными соединениями в тканях растений [10]; 4 — оптимизация транспорта микро- и макроэлементов [11]. Возможность действия ряда механизмов косвенно подтверждают высокие концентрации мономеров и полимеров кремниевой кислоты, обнаруженные в клеточном соке растений [12].

В настоящее время можно выделить 3 группы кремниевых препаратов, используемых в сельском хозяйстве: 1 — кремниевые почвенные мелiorанты в основном воздействуют на свойства почвы, такие как адсорбционная способность, структура, pH и другие, их обычно вносят в дозах >500 кг/га. К ним относятся силикат кальция, цеолит, диатомит и другие [13]; 2 — кремниевые удобрения применяют для обеспечения питания растений кремнием. Их вносят в дозах от 50 до 500 кг/га. К данной группе можно отнести аморфный диоксид кремния (микросилика, пирогенная двуокись кремния), кремниевый гель, силикаты натрия и калия [5]; 3 — кремниевые биостимуляторы — новый класс кремниевых агрохимикатов. Их применяют для опрыскивания растений в дозах <10 кг/га [14].

Цель работы — изучение влияния 2-х типов кремниевых биостимуляторов на физиологическое состояние растений пшеницы и сахарной свеклы в условиях кратковременного низкотемпературного стресса.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения тепличного эксперимента были взяты пшеница (*Triticum aestivum* L., сорт Новосибирская 41 как представитель однодольных растений) и сахарная свекла (*Beta vulgaris* L., сорт Богема как представитель двудольных растений). Перед посадкой семена были обработаны раствором 3%-ного H_2O_2 и промыты в дистиллированной воде. Растения выращивали в пластиковых сосудах объемом 1 л, наполненных смесью, содержащей торф верховой (60%), песок (30%) и известь (10%). Величина pH_{H_2O} смеси составила 6.0. В каждый сосуд высевали по 10 семян пшеницы или по 5 семян сахарной свеклы. Растения выращивали в течение 25 сут при следующих условиях: температура воздуха $26 \pm 4^\circ C$ днем и $22 \pm 2^\circ C$ — ночью, световой период 12 ч, относительная влажность воздуха $85 \pm 5\%$ днем и $78 \pm 5\%$ — ночью. Влажность грунта поддерживали в интервале 20–40% ПВ путем полива дистиллированной водой. Затем часть горшков была помещена на 12 ч в холодную комнату с температурой $6^\circ C$ для симуляции кратковременного холодового стресса, после чего растения выращивали в прежних условиях в течение еще 1 нед.

Были использованы Si-биостимуляторы 2-х типов: 1 — твердый Si-биостимулятор (**АпаСил**) с содержанием Si 47% (АО «Апатит», Россия) и 2 — жидкий Si-биостимулятор **Ecosil**, представляющий собой стабилизированную монокремниевую кислоту с содержанием Si 15% и содержанием Na 15% (Beijing Plum Agrochemical Trading Co., Ltd., Китай). Биостимуляторы разбавляли дистиллированной водой в пропорции 1 : 500 и опрыскивали растения в дозах 0.1 и 0.25 мг/сосуд, что соответствовало дозам 1.0 и 2.5 кг/га, дважды — за 3-е сут до и через 1 ч после действия холодового стресса. Суммарные дозы каждого биостимулятора составили 0.2 и 0.5 мг/сосуд, что соответствовало дозам внесения 2.0 и 5.0 кг/га. Параллельно биостимуляторами обрабатывали не подвергавшиеся охлаждению контрольные растения.

Через 24 ч после охлаждения были взяты образцы листьев пшеницы и сахарной свеклы, из которых сразу был приготовлен грубый гомогенат для анализа активности антиоксидантов. Развитие стресс-реализующих реакций в подверженных холодовому стрессу листьях было оценено по концентрации веществ, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (**ТБК**), как индикатора интенсивности перекисного окисления липидов и по активности ферментативных антиоксидантов: аскорбатпероксидазы (**АсП**), глутатионредуктазы (**ГР**) и гваякол-пероксидазы (**ГПХ**) [15].

В конце эксперимента измеряли массу растений пшеницы и сахарной свеклы, а также отбирали образцы почв и растений. В почве определяли содержание водорастворимых и кислотораство-

римых форм кремния с использованием описанных ранее методик [16].

Для определения содержания общего кремния в тканях растений, высушенные при 65°C образцы растений сжигали в микроволновой печи с использованием NaOH–H₂O₂ смеси [17], затем в полученных растворах определяли содержание кремния.

Свежие образцы листьев растений анализировали на содержание пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов) с использованием ацетоновых экстрактов [18].

Образцы почв отбирали в 3-кратной повторности, образцы растений – в 5-кратной. Полученные результаты статистически обрабатывали для определения доверительного интервала при $p \leq 0.05$, используя программу EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Под действием кратковременного холодового стресса значительно уменьшилась биомасса растений пшеницы и незначительно изменилась биомасса растений сахарной свеклы (табл. 1). Оба кремниевых биостимулятора увеличили биомассу пшеницы на 41 и 40% и биомассу сахарной свеклы – на 27 и 32% в условиях низкотемпературного стресса и в его отсутствие соответственно. Действие обоих биостимуляторов было сходным.

Оба кремниевых биостимулятора не влияли на концентрации водорастворимых и кислоторастворимых форм Si в почве, которые составили 8.3 ± 0.2 и 180 ± 15 мг Si/кг соответственно. Содержание Si в корнях и листьях пшеницы (0.85 ± 0.05 и $0.80 \pm 0.04\%$ Si) и сахарной свеклы (0.43 ± 0.03 и $0.32 \pm 0.03\%$ Si) также не изменилось при обработке тестируемыми препаратами.

Воздействие низкой температуры вызвало снижение содержания фотосинтетических пигментов в листьях контрольных растений (на 2.4–7.1% у пшеницы и на 5.2–6.8% у сахарной свеклы) (табл. 2). Обработка кремниевыми препаратами обеспечила увеличение содержания хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов в обоих видах контрольных и подверженных холодовому стрессу растений. Различия в эффективности кремниевых биостимуляторов было незначительным. Содержание фотосинтетических пигментов увеличивалось с увеличением дозы препарата.

Без обработки кремнием содержание ТБК-продуктов при воздействии низкой температуры не изменилось в листьях пшеницы и незначительно увеличилось (от 56 до 59 нмоль/г сырой массы) в листьях сахарной свеклы. Оба кремниевых биостимулятора существенно снизили содержание ТБК-продуктов в листьях обоих видов растений по сравнению с контролем (табл. 3). Более значительное снижение наблюдали при обработке растений препаратом Ecosil 5 кг/га.

Таблица 1. Влияние кремниевых биостимуляторов на сухую биомассу растений пшеницы и сахарной свеклы, г/растение

	Пшеница		Сахарная свекла	
	корни	стебли	корни	стебли
В отсутствие холодового стресса				
Контроль	0.11	0.23	0.09	0.076
АпаСил 2 кг/га	0.15	0.29	0.10	0.081
АпаСил 5 кг/га	0.17	0.31	0.11	0.093
Ecosil 2 кг/га	0.14	0.26	0.11	0.080
Ecosil 5 кг/га	0.15	0.32	0.12	0.092
В условиях холодового стресса				
Контроль	0.09	0.21	0.09	0.077
АпаСил 2 кг/га	0.12	0.25	0.11	0.083
АпаСил 5 кг/га	0.13	0.27	0.13	0.092
Ecosil 2 кг/га	0.13	0.24	0.12	0.084
Ecosil 5 кг/га	0.14	0.28	0.13	0.091
HCP ₀₅	0.02	0.02	0.02	0.002

Воздействие низких температур, а также обработка препаратами кремния оказали слабое либо незначительное влияние на активность ГР. В условиях холодового стресса активность ГР в листьях пшеницы уменьшалась от 0.88 до 0.68 мкмоль/г сырой массы. Обработка кремниевыми биостимуляторами вызвала увеличение активности ГР только в растениях пшеницы, подверженных низкой температуре. В растениях сахарной свеклы кремниевые биостимуляторы увеличили активность ГР независимо от наличия холодового стресса. Более высокую эффективность продемонстрировал препарат Ecosil в дозе 5 кг/га, увеличив активность ГР от 0.20 до 0.29 мкмоль/г и от 0.22 до 0.33 мкмоль/г в отсутствие и в условиях холодового стресса соответственно.

В отношении активности АсП растения пшеницы были более отзывчивы на обработку кремниевыми препаратами по сравнению с сахарной свеклой. Низкотемпературное воздействие привело к снижению активности АсП от 5.8 до 4.6 мкмоль/г в пшенице и к увеличению данного показателя от 3.1 до 4.1 мкмоль/г в сахарной свекле. Обработка кремниевыми биостимуляторами обеспечила двукратное увеличение активности АсП в пшенице, тогда как в сахарной свекле увеличение активности составило только 19 и 9.7% в отсутствие и в условиях холодового стресса соответственно.

Активность ГПХ также более заметно изменилась под влиянием кремниевых препаратов в пшенице по сравнению с сахарной свеклой. Охлаждение вызвало активацию ГПХ от 15.6 до 17.5 мкмоль/г в листьях пшеницы и от 0.58 до 0.68 мкмоль/г в листьях сахарной свеклы. Обработка препаратом Ecosil привела к увеличению

Таблица 2. Содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов в листьях пшеницы и сахарной свеклы, мг/кг сухой массы

	Пшеница			Сахарная свекла		
	хл. <i>a</i>	хл. <i>b</i>	каротиноиды	хл. <i>a</i>	хл. <i>b</i>	каротиноиды
В отсутствие холодового стресса						
Контроль	0.903	0.802	0.604	0.745	0.586	0.804
АпаСил 2 кг/га	0.917	0.814	0.613	0.759	0.593	0.824
АпаСил 5 кг/га	0.922	0.816	0.622	0.775	0.603	0.829
Ecosil 2 кг/га	0.918	0.813	0.620	0.760	0.605	0.823
Ecosil 5 кг/га	0.925	0.817	0.621	0.783	0.604	0.828
В условиях холодового стресса						
Контроль	0.845	0.745	0.589	0.706	0.546	0.756
АпаСил 2 кг/га	0.900	0.783	0.585	0.735	0.548	0.778
АпаСил 5 кг/га	0.911	0.811	0.603	0.754	0.559	0.784
Ecosil 2 кг/га	0.905	0.794	0.594	0.730	0.550	0.779
Ecosil 5 кг/га	0.913	0.814	0.602	0.759	0.559	0.785
HCP ₀₅	0.025	0.025	0.20	0.020	0.025	0.020

активности ГПХ до 21.6 мкмоль/г (на 38.4%) в не подверженной охлаждению пшенице и до 24.6 мкмоль/г (на 40.6%) при охлаждении, тогда как соответствующее увеличение активности ГПХ в сахарной свекле составило 25.8 и 22.0%.

Полученные результаты свидетельствовали, что использованные кремниевые препараты могли быть классифицированы как эффективные биостимуляторы. Действие обоих кремниевых препаратов было сходным. Предполагаем, что оба препарата служат источником образования монокремниевой кислоты — биохимически активной формы кремния, способной стимулировать антиоксидантную систему растений. Si-опосредованная активация ферментов-антиоксидантов зависела от вида растения. В случае пшеницы низкотемпературное воздействие и обработка кремнием оказывали слабое и неоднозначное влияние на активность ГР, тогда как в сахарной свекле оба фактора вызвали значительное увеличение данного показателя. Изменение активности АсП под действием кремния, напротив, было более существенным в растениях пшеницы по сравнению с сахарной свеклой.

Кремний-опосредованная защита растений могла быть обусловлена: 1 — косвенным влиянием на механизмы передачи внутриклеточных сигналов, что приводило к формированию ответной реакции клетки на внешнее воздействие, либо 2 — непосредственным влиянием на синтез соединений, участвовавших в инактивации АФК.

Участие активных форм кремния в функционировании сигнальной системы растений сложно подтвердить непосредственно существующими химическими и физическими методами, однако ряд авторов указывал на такую возможность [19].

Известно, что любой стресс инициирует усиленное поглощение и перераспределение Si внутри растения, обеспечивая его накопление в местах, подверженных стрессу [20]. Предполагаем, что активные формы Si способны напрямую участвовать в синтезе ферментов и стресс-белков. Этот механизм может включать следующие этапы:

1 — инициация. Кремнийсодержащий биостимулятор активирует сигнальную систему растения, что может привести к дополнительной транслокации Si в ткани, подверженные стрессу;

2 — поглощение кремния. Монокремниевая кислота начинает активно поглощаться из почвы через корневую плазмалемму (клеточный “шлюз”) и образовывать полимеры кремниевой кислоты [4, 12];

3 — распределение кремния. Соединения кремния частично поступают в эпидермальный слой, корневые чехлики, клеточные стенки и другие органы и ткани. Часть поглощенного Si аккумулируется в клетке в виде кремниевого геля, который может являться основой для дальнейшего низкотемпературного синтеза органических соединений. Другая часть Si хранится “про запас” в виде поликремниевой кислоты или геля внутри клеток или в межклеточном пространстве [12];

4 — синтез органических соединений. Синтез возможен на поверхности новообразованного кремниевого геля [22]. Процесс начинается с адсорбции органических молекул на поверхности геля и сопровождается определенными изменениями поверхности, приводящими к формированию специальной матрицы, которая “запоминает” структуру адсорбированной молекулы. После удаления реплицирующийся молекулы модифи-

Таблица 3. Содержание ТБК-продуктов и активность ферментов-антиоксидантов в листьях пшеницы и сахарной свеклы

Вариант	ТБК- продукты, нм/г сырой массы	ГР	АсП	ГПХ
		мкмоль/г сырой массы		
Листья пшеницы				
В отсутствие холодового стресса				
Контроль	69	0.88	5.8	15.6
АпаСил 2 кг/га	54	0.75	6.8	17.5
АпаСил 5 кг/га	35	0.75	7.9	19.4
Ecosil 2 кг/га	35	0.82	8.5	20.4
Ecosil 5 кг/га	32	0.79	10.4	21.6
В условиях холодового стресса				
Контроль	70	0.68	4.6	17.5
АпаСил 2 кг/га	78	0.61	5.4	22.5
АпаСил 5 кг/га	70	0.72	7.9	20.5
Ecosil 2 кг/га	58	0.68	6.4	23.2
Ecosil 5 кг/га	69	0.83	8.2	24.6
НСР ₀₅	3	0.08	0.3	0.6
Листья сахарной свеклы				
В отсутствие холодового стресса				
Контроль	56	0.20	3.1	0.58
АпаСил 2 кг/га	47	0.25	3.5	0.63
АпаСил 5 кг/га	42	0.28	3.6	0.2
Ecosil 2 кг/га	45	0.26	3.4	0.62
Ecosil 5 кг/га	41	0.29	3.7	0.73
В условиях холодового стресса				
Контроль	59	0.22	4.1	0.68
АпаСил 2 кг/га	50	0.28	3.9	0.78
АпаСил 5 кг/га	48	0.32	4.0	0.83
Ecosil 2 кг/га	48	0.27	4.2	0.76
Ecosil 5 кг/га	45	0.33	4.5	0.82
НСР ₀₅	3	0.03	0.3	0.05

Примечание. Тиобарбитуровая кислота – ТБК, аскорбатпероксидаза – АсП, глутатионредуктаза – ГР, гваякол-пероксидаза – ГПХ.

цированная Si-гелевая матрица обеспечивает каталитический синтез копий данной молекулы [22]. Этот процесс широко используется в органической химии и фармакологии [23].

Таким образом, стресс-фактор активирует сигнальную систему растений, инициируя дополнительный синтез стресс-белков и антиоксидантов. Одновременно с этим растение усиливает поглощение Si извне и инициирует перераспределение уже накопленного Si в подверженный стрессу орган. Получив информацию о стрессе, ядро клетки инициирует дополнительный синтез со-

единений защиты или их фрагментов, таких как стресс-белки, антиоксидантные ферменты и низкомолекулярные антиоксиданты. Синтезированные молекулы затем транспортируются в поврежденные органы. Однако при сильном стрессе скорость синтеза и количество синтезируемых соединений могут быть недостаточными. В результате нарастающего дефицита энергии и времени процесс синтеза “обычных” соединений, необходимых для функционирования клеток, замедляется или даже прекращается. Предполагаем, что некоторые из защитных соединений (или их фрагментов) могут перемещаться внутри клетки и сорбироваться кремниевым гелем, что обеспечивает их низкотемпературный каталитический синтез. Таким образом, Si-гелевая матрица может способствовать дополнительному синтезу защитных соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что как жидкая, так и твердая формы препаратов Si, использованные в низких дозах (2–5 кг Si/га), способствовали повышению устойчивости пшеницы и сахарной свеклы к холодовому стрессу. Оба препарата можно классифицировать как эффективные биостимуляторы благодаря способности повышать активность антиоксидантных ферментов, таких как аскорбатпероксидаза (АсП), глутатионредуктаза (ГР), гваякол-пероксидаза (ГПХ) и снижать уровень перекисного окисления липидов.

Особенности антиоксидантной системы испытанных растений различались в зависимости от вида. У пшеницы холодовой стресс в основном усиливал активность АсП и ГПХ, в то время как у сахарной свеклы он приводил к активации ГР.

Выдвинуто предположение, что кремниевые соединения могут непосредственно участвовать в синтезе стресс-белков и ферментов или их фрагментов. При этом ключевую роль играют поликремниевые кислоты. Поликремниевые кислоты могут образовывать кремниевый гель, обладающий специфическими поверхностными свойствами, облегчающими синтез органических молекул. Однако данная гипотеза нуждается в экспериментальном подтверждении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Posmyk M.M., Szafranska K. Biostimulators: a new trend towards solving an old problem // Front. Plant Sci. 2016. № 7. P. 748.
2. Rouphael Y., Colla G. Biostimulants in agriculture // Front. Plant Sci. 2020. № 11. P. 40.
3. Choudhury F. K., Rivero R. M., Blumwald E., Mittler R. Reactive oxygen species. Abiotic stress and stress combination // Plant J. 2017. V. 90. № 5. C. 856–867.
4. Epstein E. Silicon // Annual Review of Plant Biology. 1999. V.50. № 1. C. 641–664.

5. Tubana B.S., Babu T., Datnoff L.E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives // *Soil Sci.* 2016. V. 181. № 9/10. С. 393–411.
6. Kim Y.H., Khan A.L., Waqas M., Lee I.J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review // *Front. Plant Sci.* 2017. № 8. P. 510.
7. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system // *Biotech.* 2019. V. 9. № 3. P. 73.
8. Vivancos J., Labbé C., Menzies J.G., Bélanger R.R. Silicon-mediated resistance of *Arabidopsis* against powdery mildew involves mechanisms other than the salicylic acid (SA)-dependent defense pathway // *Mol. Plant Pathol.* 2015. V. 16. № 6. P. 572–582.
9. Frazão J.J., de Mello Prado R., de Souza Júnior J.P., Rossatto D.R. Silicon changes C : N : P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–10.
10. Ji X., Liu S., Huang J., Bocharnikova E., Matichenkov V. Monosilicic acid potential in phytoremediation of the contaminated areas // *Chemosphere.* 2016. V. 157. P. 132–136.
11. Souri Z., Khanna K., Karimi N., Ahmad P. Silicon and plants: current knowledge and future prospects // *J. Plant Growth Regul.* 2021. V. 40. № 3. P. 906–925.
12. Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Кособрохов А.А., Биль К.Я. О подвижных формах кремния в растениях // *Докл. РАН.* 2008. Т. 418. № 2. С. 279–281.
13. Куликова А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. 176 с.
14. Artyszak A., Gozdowski D., Siuda A. Effect of the application date of fertilizer containing silicon and potassium on the yield and technological quality of sugar beet roots // *Plants.* 2021. V.10. № 2. P. 370.
15. Балахнина Т.И., Надёжжина Е.С. Влияние селена на рост и антиоксидантный потенциал пшеницы *Triticum aestivum* L. при развитии окислительного стресса, индуцированного свинцом // *Физиология растений.* 2017. Т. 64. № 2. С. 151–160.
16. Матыченков И.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва–растение и методы их определения // *Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение.* 2016. № 3. С. 37–46.
17. Saihua L., Yunhe X., Ji X., Juan H., Bocharnikova E.A., Matichenkov V.V. Microwave digestion for colorimetric determination of total Si in plant and mineral samples // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2018. V. 49. № 7. P. 840–847.
18. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determination of total carotenoids and chlorophylls A and B of leaf in different solvents // *Biochem. Soc. Trans.* 1985. № 11. P. 591–592.
19. Johnson S.N., Hartley S.E., Ryalls J.M., Frew A., Hall C.R. Targeted plant defense: silicon conserves hormonal defense signaling impacting chewing but not fluid-feeding herbivores // *Ecology.* 2021. V. 102. № 3. e03250.
20. Verma K.K., Singh P., Song X.P., Malviya M.K., Singh R.K., Chen G.L., Solomon S., Li Y.R. Mitigating climate change for sugarcane improvement: role of silicon in alleviating abiotic stresses // *Sugar Tech.* 2020. V. 22. P. 741–749.
21. Wei W., Ji X., Saihua L., Bocharnikova E., Matichenkov V. Effect of monosilicic and polysilicic acids on Cd transport in rice, a laboratory test // *J. Plant Growth Regul.* 2021. № 1–12.
22. Banerjee A.K., Laya Mimo M.S., Vera Vegas W.J. Silica gel in organic synthesis // *Russ. Chem. Rev.* 2001. V. 70. № 11. P. 971–990.
23. Maurya C. K., Mazumder A., Kumar A., Gupta P.K. Synthesis of disulfanes from organic thiocyanates mediated by sodium in silica gel // *Synlett.* 2016. V. 27. № 3. P. 409–411.

Effect of Silicon-Containing Biostimulants on the Cold Resistance of Wheat and Sugar Beet

A. O. Grankina^a, E. A. Bocharnikova^a, and V. V. Matychenkov^{a,*}

^a Federal Research Center “Pushchinsky Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences” –
Institute of Fundamental Problems of Biology of the RAS

ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia

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

The effect of liquid and solid silicon-containing preparations on the adaptation of wheat and sugar beet plants to the short-term effect of low temperatures was studied in a vegetation experiment. Silicon preparations were used for spraying plants in doses of 2 and 5 kg Si/ha. In the absence of cold stress, treatment with silicon preparations increased the mass of roots and aboveground organs of wheat by 27–54 and 13–39%, sugar beet – by 11–33 and 5–22%, respectively. The use of silicon preparations under conditions of low-temperature stress provided an increase in the mass of roots and aboveground organs of wheat by 33–55 and 14–28%, sugar beet – by 22–44 and 7–19%, respectively. Both drugs enhanced the activity of antioxidant enzymes (ascorbate peroxidase, glutathione reductase and guaiacol peroxidase) and inhibited the intensity of lipid peroxidation processes. The use of silicon preparations also significantly increased the content of photosynthetic pigments both in the absence and in conditions of low-temperature stress. The data obtained made it possible to attribute the tested drugs to effective biostimulants and testified to the prospects of their use in order to increase the resistance of wheat and sugar beet plants to low-temperature stress.

Key words: silicon-containing biostimulants, plant cold resistance, wheat, sugar beet.

УДК 631.811.98:631.559:633.11“324”

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ПИРАЗОЛОПИРИДИНОВ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ¹

© 2022 г. В. В. Тараненко^{1,*}, И. Г. Дмитриева², В. С. Муравьев¹

¹Федеральный научный центр биологической защиты растений
350039 Краснодар-39, Россия

²Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина
350044 Краснодар, ул. Калинина, 13, Россия

*E-mail: viktaranen@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.02.2022 г.

После доработки 02.03.2022 г.

Принята к публикации 15.03.2022 г.

Проведен скрининг новых регуляторов роста озимой пшеницы в классе производных пиразолопиридинов, среди которых выявлены соединения, обладающие существенным и достоверным рост-стимулирующим эффектом. В 3-летних полевых испытаниях (2019–2021 гг.) потенциальных регуляторов роста на растениях озимой пшеницы сорта Безостая 100 показано, что применение изученных веществ способствовало увеличению продуктивного кущения культуры, формированию более мощной листовой поверхности, и, как следствие, усилению дыхательной и фотосинтетической активности. Наблюдали также положительное влияние исследованных продуктов на рост и развитие органов, формирующих структуру урожая. Прибавка урожая от применения регуляторов роста составила 12.5–14.8%, одновременно повысилось качество зерна. Отмечено увеличение сопротивляемости растений неблагоприятным условиям среды.

Ключевые слова: регуляторы роста растений, озимая пшеница, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188122060096

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность производства сельскохозяйственной продукции в настоящее время зависит от научно-исследовательской и инновационной деятельности, направленной на получение и внедрение новых знаний и технических решений в сельское хозяйство [1].

Регуляторы роста растений (**PPP**), созданные на основе передовых научных достижений в химии, биологии, физиологии растений, обеспечивают повышение урожайности и качества выращиваемой продукции, усиливают сопротивляемость болезням и стрессовым ситуациям, улучшают качество продукции [2]. В странах с развитым сельским хозяйством регуляторы роста широко разрабатывают и применяют [3–5].

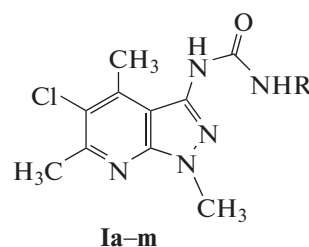
Пшеница является одной из стратегических сельскохозяйственных культур в растениеводстве России. Озимая пшеница – наиболее ценная ее разновидность. Она рано созревает, поэтому посевы меньше подвергаются летней засухе [6].

Очевидно, что разработка новых регуляторов роста, способствующих повышению урожайности

озимой пшеницы и улучшению качества зерна, является задачей актуальной. Цель работы – поиск новых регуляторов роста озимой пшеницы в классе производных пиразолопиридинов. Азотсодержащие гетероциклы являются основой многих природных биологически активных соединений [7], ранее были выявлены в их числе вещества с различными видами пестицидной активности [8–11].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Скрининг регуляторов роста проводили в ряду синтезированных производных пиразолопиридинов общей формулы I:



где R = алкил, циклоалкил, фенил, арил, гетерил.

Для синтеза новых соединений использовали классические, а также оригинальные методики, описанных ранее [12]. Структуры синтезированных

¹ Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме FGРН-2022-0006.

Таблица 1. Влияние регуляторов роста на структуру урожая озимой пшеницы (среднее за 2019–2021 гг.)

Вариант	Длина колоса, мм	Количество колосков в колосе	Количество зерен в колосе	Масса зерна в колосе	Масса 1000 зерен
		шт.		г	
Соединение Id	88	27.5	39.8	1.8	42.4
Соединение Ig	90	28.2	42.9	1.9	42.9
Соединение If	94	28.4	41.9	1.9	42.8
Контроль без обработки	81	26.6	37.0	1.6	41.0
<i>HCP</i> ₀₅	2	0.5	0.5	0.1	0.8

ных веществ подтверждены элементным анализом, а также данными ИК-, ЯМР ¹H, ЯМР ¹³C и масс-спектров.

На первом этапе биоскрининга рострегулирующую активность новых соединений определяли в условиях лабораторного опыта по стандартной методике [13]. Перспективные вещества отбирали для дальнейшего изучения в полевых условиях. Исследования выполняли на экспериментальном поле ФНЦБЗР, г. Краснодар (центральная зона Краснодарского края).

Полевые опыты проводили в 2018–2021 гг. Почва — чернозем выщелоченный обыкновенный малогумусный, характеризуется следующими показателями: содержание гумуса в пахотном слое — от 2.9 до 3.2%, верхний слой имеет нейтральную и слабокислую реакцию (рН_{H2O} 6.7–7.0), объемная масса — 1.23–1.35 г/см³, порозность — 52.0–54.0%.

Климат зоны — умеренно-континентальный, умеренно-влажный и теплый. Среднегодовая температура воздуха составляет 10.0–10.8°C, среднегодовое количество осадков — 600–645 мм, распределение их по месяцам неравномерное, коэффициент увлажнения равен 0.25–0.40.

Суммарное количество осадков за период от посева до созревания озимой пшеницы (октябрь–июль) составило в 2018/2019 г. — 614.4 мм, в 2019/2020 г. — 464.0 мм, в 2020/2021 — 576.2 мм при среднемноголетней норме 549 мм. В целом погодные условия для проведения исследования были благоприятными для роста и развития растений озимой пшеницы в полевые сезоны 2019 и 2021 гг., сезон 2020 г. был засушливым.

Предшественником во все годы проведения опытов была озимая пшеница. Обработка почвы по типу полупара включала в себя трехкратное лущение стерни тяжелой дисковой бороной БДТ-3 на глубину 10–12 см, с последующим прикатыванием кольчато-шпоровыми катками ЗККШ-6А. Предпосевную культивацию выполняли на глубину заделки семян 5–6 см. Посев озимой пшеницы сорта Безостая 100 проводили семенами первого класса в оптимальный срок для цен-

тральной зоны Краснодарского края селекционной сеялкой центрального точного высева с нормой высева 5.0 млн всхожих семян/га. Удобрения не применяли (нулевой фон). Расположение делянок — рендомизированное, учетная площадь делянки 5.0 м², повторность опыта четырехкратная.

Для нанесения потенциальных рострегуляторов на вегетирующие растения пшеницы готовили их водные растворы с добавлением 0.001% эмульгатора ОП-7. Обработку осуществляли дважды: в фазе кушения и в фазе флагового листа, норма расхода действующего вещества 30 г/га. Опрыскивание проводили с помощью опрыскивателя ОЭМП-16. Для эталона сравнения использовали препарат Ретацел, его наносили в те же сроки и в рекомендованных дозах. Уход за вариантами включал обработку гербицидом Прима, СЭ (0.6 л/га) в конце фазы кушения и инсектицидом Каратэ Зеон, МКС (0.2 л/га) в фазе колошения.

В соответствии с руководством по регистрационным испытаниям [14], в опыте проводили следующие наблюдения, учеты и анализы: фенология, густота стояния растений, биометрия растений после созревания, содержание основных элементов питания в зерне определяли с помощью анализатора “ФТ-7”.

Уборку полученного урожая выполняли по делянкам. С каждой делянки отбирали сноп для определения биометрических показателей. Обмолот каждой делянки проводили селекционным немецким комбайном “Hege-125”. После обмолота с каждой делянки отбирали образец зерна согласно ГОСТ 12042-80 для определения массы 1000 зерен.

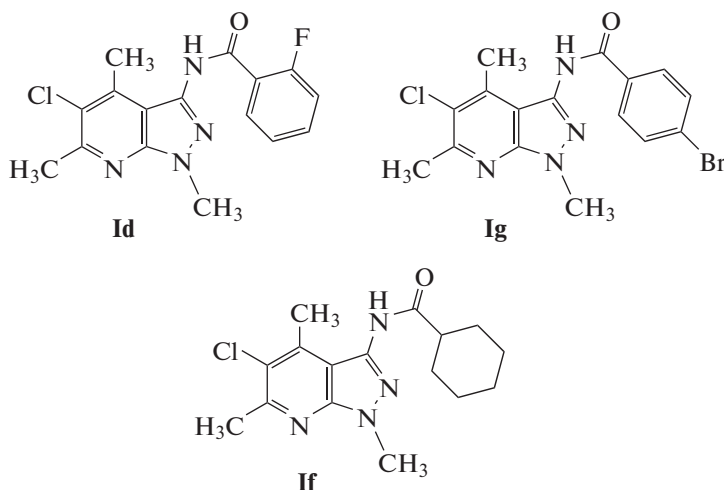
Для получения урожайных данных зерно приводили к 14%-ной влажности согласно ГОСТ 10250-80, результаты повергали математической обработке методом дисперсионного анализа с использованием программы STATISTICA [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поданным лабораторных исследований, для полевых испытаний были отобраны 3 вещества **Id**, **Ig** и **If**, которые стимулировали рост стебля и корня проростков более чем на 20%:

Таблица 2. Влияние соединения **Ig** на физиолого-биохимические процессы озимой пшеницы

Вариант	Площадь листовой поверхности, см ²	Содержание пигментов, мг/г сырого вещества			Интенсивность дыхания, мл/г/ч	Активность каталазы мл О ₂ /г/мин	Содержание витамина С, мг/100 г сырого вещества
		хлорофилл		кароти- ноиды			
		<i>a</i>	<i>б</i>				
Соединение Ig	479	4.47	1.29	1.30	2.44	21.2	4.98
Контроль	467	4.05	0.95	1.00	2.21	20.3	4.69
<i>HCP</i> ₀₅	8	0.23	0.11	0.16	0.12	0.1	0.28



В течение 3-летнего периода (2019–2021 гг.) эти соединения изучали в условиях поля на растениях озимой пшеницы сорта Безостая 100.

Следует отметить, что из-за неодинаковых погодных условий данные эксперимента отличались. Тем не менее, все изученные вещества проявили высокую стимулирующую активность. У растений, обработанных регуляторами роста, повышалась общее и продуктивное кущение, формировалась более мощная листовая поверхность во всех фазах развития растений по сравнению с контролем. Количество продуктивных стеблей в среднем увеличилось на 8–12%, высота растений – на 5–9 см. Данные о влиянии регуляторов роста на развитие органов, формирующих структуру урожая, приведены в табл. 1. Их применение способствовало увеличению длины колоса на 8.5–11.9, количества колосков в колосе – на 3.4–6.8, количество зерен колосе – на 7.5–16.0% (средние показатели за период испытаний). Масса зерна в колосе превышала контрольный вариант на 12.5–18.1, масса 1000 зерен – на 2.2–4.6%.

Увеличение ассимиляционного аппарата растений привело к усилению фотосинтетической активности культуры, ускорению процессов ды-

хания и обмена веществ в растениях (табл. 2). На примере соединения **Ig** установлено, что в обработанных растениях содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов было больше, чем в растениях без обработки (контроль). Под его влиянием увеличилась интенсивность дыхания, активность каталазы, повысилось содержание витамина С.

Использование регуляторов роста позволило получить стабильную и существенную прибавку урожая относительно контроля (табл. 3). В сред-

Таблица 3. Влияние регуляторов роста на урожайность озимой пшеницы (2019–2021 гг.), ц/га

Вариант	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее
Соединение Id	61.0	47.8	78.8	62.5
Соединение Ig	62.2	48.7	80.0	63.6
Соединение If	59.7	48.5	78.1	62.1
Ретацел (эталон)	57.9	45.8	76.0	59.8
Контроль	54.1	42.0	70.2	55.4
<i>HCP</i> ₀₅	2.2	1.9	2.4	

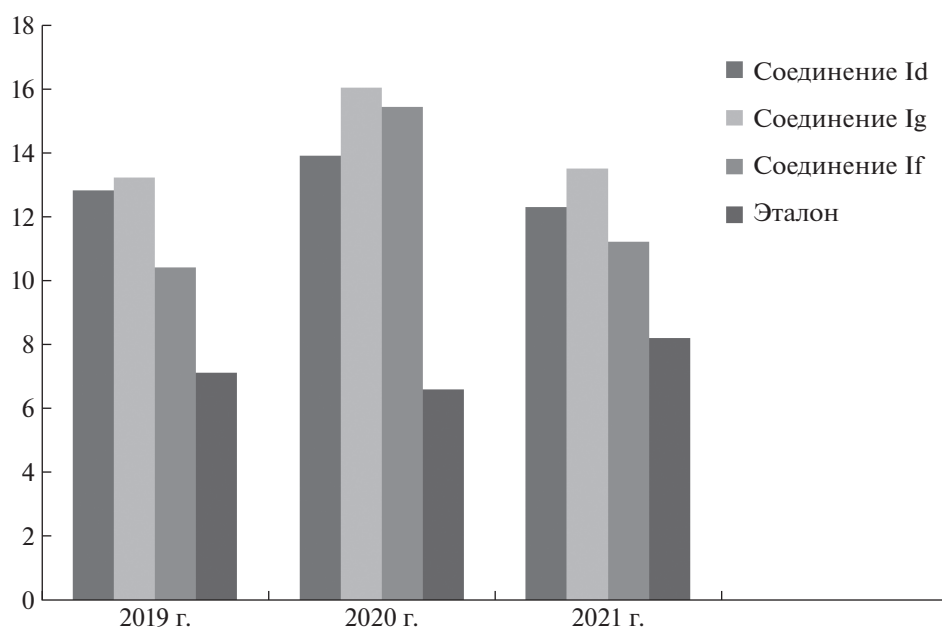


Рис. 1. Прибавка урожая озимой пшеницы от применения регуляторов роста, %.

нем за 3-летний период урожай от применения регуляторов роста повысился на 12.1–14.8%. Интересно отметить, что в засушливом 2020 г. на фоне значительного снижения урожая культуры рострегуляторы обеспечили более высокую прибавку (рис. 1).

Этот факт свидетельствовал о том, что изученные вещества обладали иммуномодулирующими свойствами, помогали растениям адаптироваться к стрессовым ситуациям, в данном случае — к засухе. Во всех вариантах урожай зерна растений, обработанных потенциальными регуляторами роста, превышал таковой в варианте с применением эталона.

Под влиянием регуляторов роста интенсивнее осуществлялось накопление белка и сырой клейковины в зерне озимой пшеницы (табл. 4). По

данным эксперимента, содержание белка в зерне увеличилось на 0.5–1.8% в сравнении с контрольным вариантом, содержание клейковины — на 0.7–4.6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследованные регуляторы роста озимой пшеницы способствовали увеличению линейного роста растений, количества продуктивных стеблей, длины колоса и количества колосков в колосе. Как следствие, повысился урожай культуры, средняя прибавка за 3-летний период составила 12.5–14.8%, повысилось также качество зерна. За счет увеличения ассимиляционного аппарата растений усиливался фотосинтетический потенциал и сопротивляемость неблагоприятным условиям среды.

Таблица 4. Влияние регуляторов роста на показатели качества зерна озимой пшеницы, %

Вариант	2019 г.		2020 г.		2021 г.	
	белок	клейковина	белок	клейковина	белок	клейковина
Соединение Id	15.6	41.8	16.1	42.0	15.4	42.3
Соединение Ig	15.8	43.0	15.9	42.9	16.0	43.4
Соединение If	15.3	41.9	15.7	43.3	15.6	42.6
Ретацел (эталон)	15.4	40.1	15.2	41.3	15.0	40.4
Контроль	14.8	38.4	14.3	41.3	14.6	39.4
HCP ₀₅	0.9	1.1	0.9	1.2	0.7	1.5

Планируется дальнейшее проведение исследований описанных соединений на других сортах озимой пшеницы и в качестве иммуномодуляторов против фитопатогенов данной культуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синяшин О.Г., Шаповал О.А., Шулаева М.М. Инновационные регуляторы роста растений в сельскохозяйственном производстве // Плодородие. 2016. № 5. С. 38–42.
2. Шаповал О.А., Можарова И.П., Барчукова А.Я. Регуляторы роста растений в агротехнологиях основных сельскохозяйственных культур. М.: ВНИИА, 2015. 347 с.
3. Nickell L.G. Plant growth regulating chemicals. CRC Press, 2018. 266 p.
4. Rademacher W. Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production // J. Plant Growth Regul. 2015. V. 34. P. 845–872.
5. He S.L., Wang S.Q., Wang Q.Y. Allelochemicals as growth regulators. Review // Allelopat. J. 2019. V. 48. P. 15–26.
6. Бершадская С.И., Нецадим Н.Н., Квашин А.А. Урожайность и качество зерна различных сортов озимой пшеницы в зависимости от предшественника, удобрений и других приемов выращивания // Научн. журн. КубГАУ. 2016. № 120. С. 1305–1321.
7. Джилкрист Т. Химия гетероциклических соединений: Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 464 с.
8. Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Назаренко Д.Ю., Стрелков В.Д. Антидотная и рострегулирующая активность N1-арил-N2-(замещенный никотинонитрил)гидразонов // Агрохимия. 2014. № 7. С. 33–37.
9. Дядюченко Л.В., Тараненко В.В., Дмитриева И.Г. Изучение рострегулирующих свойств производных пиридин-2-сульфанилацетанилидов на растениях сои // Агрохимия. 2020. № 5. С. 12–16.
10. Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Заводнов В.С., Макарова Н.А. Синтез замещенных изоксазоло[5,4-b]пиридинов и их антидотная активность // Политемат. сетев. электр. научн. журн. КубГАУ. 2016. № 122. С. 471–480.
11. Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Стрелков В.Д., Доценко С.П., Кайгородова Е.А. Синтез новых 2-алкилтионикотинитрилов и на их основе 3-аминотиено-[2,3-b]пиридинов, а также скрининг потенциальных антидотов и регуляторов роста растений // Тр. КубГАУ. 2006. № 3. С. 129–134.
12. Дмитриева И.Г., Дядюченко Л.В., Стрелков В.Д., Кайгородова Е.А. Синтез и превращения замещенных 4,6-диметилпиразоло[3,4-b]-пиридил-3-азидов и -сульфонилхлоридов // Химия гетероцикл. соед. 2008. № 10. С. 1556–1565.
13. Гост 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Введ. 19.12.1984. М.: Изд-во стандартов, 1985. 57 с.
14. Руководство проведения регистрационных испытаний регуляторов роста растений, дефолиантов и десикантов в сельском хозяйстве. М.: Минсельхоз РФ, 2018. 223 с.
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по требованию, 2012. 352 с.

Study of the Effect of the Pyrazolopyridine Derivatives on Winter Wheat Productivity

V. V. Taranenko^{a, #}, I. G. Dmitrieva^b, and V. S. Muravyov^a

^aFederal Research Center of Biological Plant Protection
Krasnodar-39 350039, Russia

^bI.T. Trubilin Kuban State Agrarian University
ul. Kalinina 13, Krasnodar 350044, Russia

[#]E-mail: viktaranen@rambler.ru

Screening of new growth regulators of winter wheat in the class of pyrazolopyridine derivatives was carried out, among which compounds with a significant and reliable growth-stimulating effect were identified. In 3-year field trials (2019–2021) of potential growth regulators on plants of winter wheat of the Bezostaya 100 variety, it was shown that the use of the studied substances contributed to an increase in productive tillering of the crop, the formation of a more powerful leaf surface, and, as a consequence, increased respiratory and photosynthetic activity. The positive effect of the studied products on the growth and development of organs forming the structure of the crop was also observed. The increase in yield from the use of growth regulators amounted to 12.5–14.8%, at the same time the quality of grain increased. An increase in the resistance of plants to adverse environmental conditions was noted.

Key words: plant growth regulators, winter wheat, yield.

УДК 633.63:632.5:632.954

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ СВЕКЛОВИЧНЫХ ГЕРБИЦИДОВ НА СОРНУЮ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ В ПОСЕВЕ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ pH ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ВОДЫ И ЕЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ БЫТОВЫМИ МОЮЩИМИ СРЕДСТВАМИ

© 2022 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 09.02.2022 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В полевых испытаниях на опытном поле ВНИИСС в 2016–2020 гг. изучили эффективность отдельных свекловичных гербицидов на сорные растения в зависимости от величины pH воды, примененной для приготовления рабочего раствора. Показано, что активность гербицидов группы бетаналов наиболее сильно снижалась в щелочной среде. Реакция гербицидов группы бетаналов на щелочность воды зависела от препаративной формы гербицида, времени задержки применения раствора и погодных условий. Моющие средства, как загрязнители воды, по степени снижения активности гербицидов на сорные растения ранжировались в порядке: кальцинированная сода > отбеливатель “Бос” > моющие средства “МИФ”, “Сорти” и др. Установлено, что критический показатель pH воды для рабочего раствора гербицидов группы бетаналов равен 8.0–8.2 при условии использования его сразу же после приготовления. В случаях применения воды с pH > 8.0–8.2 необходима коррекция ее до pH 5.5–6.5 соответствующими кислыми веществами. Гербициды Пилот, Карибу, Раундап, Лонтрел 300, Пантера, Центурион, Фюзилад Форте были более устойчивыми к щелочной среде, чем гербициды бетанальной группы.

Ключевые слова: сахарная свекла, сорные растения, гербициды, биологическая эффективность, кислотность воды, моющие средства.

DOI: 10.31857/S000218812208004X

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность большинства гербицидов, в том числе и свекловичных, изначально зависит от качества применяемого препарата и пригодности воды, используемой для наведения раствора [1, 2]. Многие гербициды восприимчивы к кислотно-щелочному балансу природной воды. Отдельные гербициды быстро разрушаются в щелочной среде, другие – в кислой среде [3, 4]. Есть препараты, которые стабильны как в кислой, так и щелочной воде, тем не менее, встречаются гербициды, которые наиболее эффективны в нейтральной среде.

Активность отдельных гербицидов, чувствительных к кислотному гидролизу, заметно снижается при pH < 7.0. Активные вещества таких гербицидов, как сульфанилмочевины (хлорсульфурон и др.), разрушаются в кислой среде, а устойчивость сорняков к ним возрастает [3, 5].

Гербициды, чувствительные к щелочному гидролизу, распадаются при pH > 7.0. К ним относят производные 2,4-Д, карбаматы, глифосат, лонтрел и другие. В щелочной среде биологическая эффективность таких гербицидов заметно снижается, и требуется коррекция pH водных растворов для успешной борьбы с сорняками [5, 6].

Зависимый от pH среды гидролиз проходит с неодинаковой скоростью для разных действующих веществ. Полураспад действующих веществ бетаналов – фенмедифама и десмедифама – при pH 5.0 воды происходит за 45–70 сут, тогда как при pH 9.0 – за 7–12 мин [7]. Напротив, скорость полураспада действующих веществ препаратов метсульфурон-метила, дикамбы, глифосата в аналогичных средах изменяется менее существенно [8, 9]. Имеющиеся противоречия в описании стабильности гербицидов в растворах свидетельствуют о необходимости исследований в этой области.

В результате загрязнения воды промышленными и бытовыми отходами кислотность воды может варьировать в более широких пределах [10]. Дegrадацию средств защиты растений в щелочной ($\text{pH} > 8.0$) или кислой ($\text{pH} < 5.0$) среде снижают включением в раствор адъювантов, содержащих кислоты и буферные добавки [4, 5].

Компания «АгроМастер» предложила препарат ДМП Контрол, представляющий собой определитель и регулятор кислотности рабочего раствора, диспергатор и прилипатель. Кислотность раствора контролируется изменением цвета воды, что позволяет легко определить требуемый pH-показатель.

В настоящее время подобные препараты представлены различными фирмами. Например, Текнофит pH используется как кондиционер воды, в составе которого поли-гидрокси-карбокислоты — 20%, pH — 2.0; Айвори — подкислитель воды (Укравит) включает органические кислоты, индикатор уровня по цвету воды; Полидон-корректор pH, который также позволяет улучшить смачиваемость обрабатываемых объектов и др.

В приготовлении растворов свекловичных гербицидов наибольший интерес вызывают подкислители растворов, особенно принимая во внимание, что pH природной воды чаще сдвинут в щелочную сторону (> 7.0), и повышенную чувствительность гербицидов группы бетаналов к щелочному гидролизу.

Для подкисления воды чаще используют лимонную, уксусную, орто-фосфорную кислоты. Снизить pH воды также можно включением в раствор кислых комплексных удобрений.

Частой причиной загрязнения природной воды, особенно небольших водоемов — прудов, озер, помимо пестицидов и удобрений, являются отходы бытового назначения. В состав веществ, содержащихся в воде, входят моющие средства, химикаты санитарной гигиены, и многое другое. Проблема некачественной воды особенно велика в сельской местности, где техногенные нагрузки на почву и окружающую среду носят систематический характер [10].

В состав большинства моющих средств помимо карбонатов (кальцинированной соды, мыла) входят фосфаты, силикаты, цеолиты, бораты, ПАВ и другие вещества, характеризующиеся щелочной реакцией с водой. В последние годы количество фосфатов в сточных водах резко возросло из-за того, что в составе многих синтетических ПАВ до 40% их массы составляют полифосфаты. Фосфаты токсичны для окружающей среды, особенно для непроточных водоемов, поэтому в пе-

редовых странах их применение в моющих средствах ограничено или запрещено. В современных моющих средствах вместо фосфатов могут применять цеолиты (алюмосиликаты) и силикаты, которые выполняют функцию адсорбентов.

Цель работы — изучение влияния pH природной воды, используемой для приготовления раствора свекловичных гербицидов, времени задержки применения наведенного раствора, степени загрязненности воды моющими бытовыми отходами и погодных условий на эффективность действия приготовленных растворов в борьбе с сорной растительностью в посеве сахарной свеклы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на опытном поле ВНИИС в 2016–2020 гг. Объектом исследования служили сорные растения, сахарная свекла и гербициды: Бетанал Эксперт ОФ, Бицепс Гарант, Бифор Прогресс, Бетанал 22, Бифор 22, Бельведер, МаксПро, Пилот, Карибу, Пирамин Турбо, Пантера, Фюзилад Форте, Центурион, Раундап, Лонтрел 300. В 2016–2018 гг. опыты размещали на паровом поле, что позволяло в течение одного вегетационного сезона 2–3 раза воспроизвести опыт в разных условиях погоды. Для этого достаточно было прокультивировать новый участок парового поля и получить всходы сорняков. Почва опытного участка — чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый. В 2019–2020 гг. основные варианты опыта воспроизвели в посеве сахарной свеклы.

Для приготовления растворов с гербицидами использовали речную воду (р. Воронеж около пгт. Рамонь, Воронежской обл.), которую в опытах подкисляли раствором ортофосфорной кислоты или подщелачивали пищевой содой, каустической содой или едким натром в зависимости от требуемой pH среды. Кислотность воды контролировали прибором Soil PH Meter PCE — PH 20S. Раствор гербицида готовили в следующей последовательности: вначале корректировали pH воды до требуемой величины, затем растворяли в ней гербицид. Гербициды вносили по отросшим сорнякам в фазе семядолей–2-х пар настоящих листьев ранцевым опрыскивателем, оборудованным штангой (2.7 м) с 6-ю щелевыми распылителями на 6 рядков сахарной свеклы.

Схема опытов включала: контроль абсолютный и варианты с гербицидами, приготовленными на разной по кислотности воде (табл. 1). Площадь делянки 21.6 м², повторность опытов двукратная, размещение делянок последовательное. Гербициды на делянке вносили однократно в ве-

Таблица 1. Эффективность гербицидов в зависимости от pH использованной воды (2016–2017 гг.)

Гербицид, л/га	Время удержания препарата в растворе до его применения, ч	Величина pH, ед.					
		3.0	5.0	7.0	8.0	9.0	10.0
		эффективность гибели сорняков, %					
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2	1–1.5	96	96	96	94	80	50
Бицепс Гарант, 1.2	1–1.5	95	94	92	88	60	42
Бетанал 22, 1.0	1–1.5	99	98	98	96	76	40
Бифор 22, 1.0	1–1.5	98	98	98	94	75	50
Бельведер, 1.0	1–1.5	97	98	98	97	94	84
Бетанал максПро, 1.5	1–1.5	98	98	97	95	90	82
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2	10–12	98	96	92	88	60	15
Бицепс Гарант, 1.2	10–12	94	94	90	75	20	5
Бетанал 22, 1.0	10–12	100	99	96	90	60	5
Бифор 22, 1.0	10–12	100	98	95	84	55	0
Бельведер, 1.0	10–12	97	95	90	82	23	5
Бетанал максПро, 1.5	10–12	98	98	94	91	55	10

Примечание. Контроль: сорняки – 480 шт./м²; доля щирицы – 82, мари белой – 9, злаков – 3, прочих – 6%.

чернее время, учеты сорняков проводили через 7–8 сут после обработки гербицидами методом наложения рамки (0.25 × 1.0 м). Посев, уход за посевами, уборку сахарной свеклы проводили согласно общепринятым зональным рекомендациям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что гербициды группы бетаналов сохраняли высокую активность в кислой среде. Эффективность бетаналов, примененных в кислых растворах, возрастала в условиях теплой сухой погоды с достаточным количеством влаги в почве независимо от времени задержки обработки сорняков (табл. 1). Сокращался период летального действия бетаналов на сорняки, увеличивалась жесткость их действия на сорную растительность и растения культуры.

Действие бетаналов, приготовленных в нейтральной среде (в воде с pH 7.0), было относительно мягким, с более продолжительным периодом летального действия на сорняки, что не снижало в целом эффективность гербицидов.

Слабощелочная реакция воды (pH 8.0) была критической. В этом случае для эффективной борьбы с сорняками предпочтительны свежеприготовленные растворы гербицидов. Задержка применения слабощелочных растворов гербицидов группы бетаналов отрицательно влияла на биологическую эффективность действующих веществ. Большинство гербицидов группы бетаналов, обладая кислой реакцией, способны до опре-

деленной степени снижать pH рабочего раствора в сторону оптимальной кислотности, а также можно ее регулировать повышением концентрации препарата в растворе за счет допустимого снижения расхода воды (зависит от условий погоды).

С увеличением щелочности воды до pH 9.0 и 10.0 биологическая эффективность гербицидов группы бетаналов резко снижалась, а при задержке применения растворов на 10–12 ч отмечено лишь отставание развития сорняков с последующим возобновлением их роста.

Реакция гербицидов группы бетаналов на щелочность воды зависела от препаративной формы гербицида и его формуляции. Трехкомпонентные гербициды были более чувствительными к щелочной среде, чем двухкомпонентные. Среди двухкомпонентных гербицидов свежие растворы суспензионных препаратов (Бельведер) были более эффективными в щелочной среде. Вместе с тем при задержке применения растворов гербицидов на 10–12 ч более всего снижалась биологическая эффективность кристаллических препаратов (Бельведер) и препаратов-эмульсий, склонных к быстрой кристаллизации и активному росту кристаллов в растворе. В щелочных растворах твердые частицы суспензии слипались и срастались, а на листьях растений в тонких пленках суспензии образовывались конгломераты различной плотности [11].

Различают гидрокарбонатную, карбонатную и гидратную щелочность, из них гидрокарбонатная оказывала наименьшее влияние на активность

Таблица 2. Эффективность гербицидов в зависимости от щелочности воды (гидрокарбонатной, карбонатной, гидратной) и погодных условий

Гербицид, л/га	Время содержания препарата в растворе до его применения, ч	Величина pH, ед.							
		речная вода	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃		NaOH			
				7.0	8.0	9.0	10.0	9.0	10.0
эффективность гибели сорняков, %									
Средняя максимальная и минимальная температура воздуха в период опыта – 28 и 18°С (18–26.06.2016 г.)									
Бифор 22, 1.0	1–1.5	96	95	76	55	83	62		
Бифор Прогресс, 1.3	1–1.5	97	94	74	47	70	40		
Бифор 22, 1.0	10	95	86	52	15	45	25		
Бифор Прогресс, 1.3	10	94	79	28	5	35	10		
Средняя максимальная и минимальная температура воздуха в период опыта – 19 и 9°С (02–10.06.2017 г.)									
Бифор 22, 1.0	1–1.5	93	93	92	90	91	90		
Бифор Прогресс, 1.3	1–1.5	94	93	90	90	91	87		
Бифор 22, 1.0	10	91	91	–	68	–	74		
Бифор Прогресс, 1.3	10	90	89	–	56	–	61		

Примечание. Контроль: сорняки – 280–340 шт./м² (ширица, марь, горцы и др.).

гербицидов группы бетаналов, т.к. гидрокарбонатная щелочность в природе не превышает показатель pH 8.2.

Природной воде, отличающейся высокой жесткостью, свойственна карбонатная щелочность, которая оказывала наибольшее влияние на активность гербицидов группы бетаналов. Гидратная щелочность была не менее разрушительна для гербицидов, как и карбонатная щелочность (табл. 2), но в природе она встречается в редких случаях.

Щелочные растворы гербицидов группы бетаналов были особенно малоэффективны в условиях жаркой погоды при нарастании температуры воздуха в дневное время до 28–34°C и высокой инсоляции солнца. Задержка с обработкой сорняков гербицидами усиливала отрицательный эффект от применения щелочных растворов. В условиях относительно прохладной сухой погоды с оптимальным содержанием влаги в почве и воздухе влияние щелочности среды заметно снижалось. В этом случае задержка применения раствора гербицида оказывала меньшее влияние на эффективность гербицидов, чем при высоких температурах воздуха.

Кислые и нейтральные растворы Бетанала Эксперт ОФ и Бетанала 22 были высокоэффективными против таких сорняков как марь белая, ширица запрокинутая, горцы, паслен черный, подмаренник цепкий и др.

Растворы Бетанала Эксперт ОФ практически не теряли активности спустя 10–12 ч после приготовления, а эффективность кислого раствора Бетанала 22 (pH 3.0) на сорняки после задержки его применения даже возрастала до 99% (табл. 3).

Эффективность щелочных растворов бетаналов на сорняки заметно снижалась, что особенно сказывалось на растениях мари белой, ширицы, просвирника, горцев. Задержка применения растворов бетаналов на 10–12 часов приводила к еще большему уменьшению активности действующих веществ, что отражалось на показателях численности и массы сорняков.

В сравнении с гербицидами группы бетаналов другие свекловичные гербициды слабее реагировали на кислотно-щелочной показатель воды. Например, препарат Пилот 3.0 л/га (метамитрон) активно подавлял вегетирующие сорняки в фазе семядоли–4 настоящих листа независимо от pH использованной воды и времени задержки его внесения.

Препарат Карибу независимо от погодных условий обеспечивал полный контроль над сорняками при обработке как кислыми, так и щелочными растворами гербицида, несмотря на более низкую растворимость его в кислой среде.

После обработки раствором Карибу сорняки приобретали характерную для сульфонилмочевинных гербицидов окраску (рис. 1а), останавливался рост сорняков, растения медленно теряли массу, постепенно отмирала корневая система.

Таблица 3. Гибель сорняков в зависимости от примененного гербицида и величины рН использованной воды (2017 г.)

Гербицид, л/га или кг/га	Время удержания препарата в растворе до его применения, ч	Величина pH, ед.					
		3.0		7.0		10.0	
		снижение численности (Ч) и массы (М) сорняков, %					
		Ч	М	Ч	М	Ч	М
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2	1–1.5	96	92	95	96	78	83
Бетанал 22, 1.0	1–1.5	96	97	93	94	76	81
Пилот, 3.0	1–1.5	95	97	96	93	90	95
Карибу, 0.03	1–1.5	16	94	18	99	21	99
Пирамин Турбо, 5.0	1–1.5	19	42	16	42	12	50
Пантера, 1.0	1–1.5	100	100	100	100	100	100
Фюзилад Форте, 0.8	1–1.5	100	100	100	100	100	100
Центурион, 0.4	1–1.5	100	100	100	100	100	100
Раундап, 3.0	1–1.5	100	100	100	100	100	100
Лонтрел 300, 0.3	1–1.5	100	100	100	100	100	100
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2	10–12	94	92	91	93	68	62
Бетанал 22, 1.0	10–12	99	99	91	93	69	74
Пилот, 3.0	10–12	98	99	98	96	99	99
Карибу, 0.03	10–12	20	95	24	98	19	99
Пирамин Турбо, 5.0	10–12	22	36	12	34	17	44
Пантера, 1.0	10–12	100	100	100	100	100	100
Фюзилад Форте, 0.8	10–12	100	100	100	100	100	100
Центурион, 0.4	10–12	100	100	100	100	100	100
Раундап, 3.0	10–12	100	100	100	100	100	100
Лонтрел 300, 0.3	10–12	100	100	100	100	98	98

Примечания. 1. Контроль — количество сорняков (на разных участках): злаковые — 180, двудольные — 230, осоты — 15–20 шт./м². 2. Карибу оценивали по снижению массы сорняков без учета мари белой.

Эффективность Карибу четко характеризовал показатель снижения массы сорняков через 10 сут после обработки в сравнении с растениями в абсолютном контроле (табл. 3, рис. 1б).

Самостоятельное применение препарата Пирамин Турбо на вегетирующих сорняках было малоэффективно, препарат реагировал на величину рН щелочной среды. Угнетенные после обработки гербицидом сорняки (фаза 2–4 настоящих листа) через 5–6 сут возобновляли рост.

Препарат Лонтрел 300 активнее подавлял сорняки растворами с кислой реакцией воды, чем щелочной. Несколько сокращался период летального действия на осоты, однако в итоге в вариантах опыта отмечали 100%-ную гибель сорняков независимо от времени задержки внесения препарата и рН использованной воды.

Близкие результаты были получены в опытах с применением препарата Раундап. В разных погодных условиях Раундап эффективно уничтожал

активно растущие (высотой 15–25 см) злаковые и двудольные сорняки (однолетние и многолетние) кислыми, нейтральными и щелочными растворами препарата. В условиях жаркой сухой погоды кислые растворы Раундапа были несколько эффективнее в борьбе с засоренностью смешанного типа, но конечным результатом во всех вариантах опыта была 100%-ная гибель сорняков.

Кислотно-щелочная реакция воды не оказывала существенного влияния в полевых условиях на эффективность самостоятельно (отдельно от других) примененных граминицидов (препаратов Пантера, Фюзилад Форте, Центурион). Противозлаковые гербициды не теряли активности при короткой или продолжительной задержке применения их растворов (табл. 3). Через 10–14 сут после внесения препарата Пантера 1 л/га во всех вариантах опыта наблюдали только отрастающие двудольные сорняки (рис. 2).



Рис. 1. Особенности поражения сорняков препаратом Карибу: (а) — изменение цвета листьев после обработки, (б) — уменьшение биомассы растения на 10-е сут после обработки.



Рис. 2. Предварительный мелкоделяночный опыт по оценке влияния величины pH раствора на эффективность препарата Пантера, 1.0 л/га: распределение делянок последовательное — pH 3.0, 7.0, 10.0. Слева — обработано через 1–1.5 ч, справа — через 10–12 ч, сзади — абсолютный контроль. Слева от опыта — делянки с применением Раундапа, 3.0 л/га, величина pH 3.0 и 10.0.

В сильных щелочных растворах граминициды, примененные в смеси с гербицидами группы бетаналов, снижали активность действия на злаковые сорняки, в результате чего возрастал период летального воздействия гербицидов, особенно при задержке применения смеси на культуре (рис. 3). В условиях сухой жаркой погоды возрастала устойчивость злаковых сорняков к действию щелочного раствора смеси гербицидов. Позднее выпавшие дожди были способны возобновить

рост злаковых сорняков. При раздельном внесении гербицидов с разницей во времени 5–7 сут активность щелочного раствора граминицидов была на уровне 95–99%.

В сильной щелочной среде (pH 9.0–10.0) гербициды группы бетаналов, примененные в смеси с Лонтрелом 300, Центурионом или Пилотом, в разной степени снижали эффективность действия последних в сравнении с их самостоятель-

ным применением, чего не наблюдали в условиях кислого и нейтрального растворов смеси.

Ближкие результаты были получены в 2019–2020 гг. в посеве сахарной свеклы. Показано, что использованная вода различной кислотности не оказывала существенного влияния на продуктивность сахарной свеклы (вариант с ручной прополкой), тогда как растворы гербицидов, приготовленные на щелочной воде, заметно снижали урожайность корнеплодов (табл. 4). В этом случае урожайность сахарной свеклы в вариантах 2–4 варьировала в зависимости от композиции примененных препаратов. Схемы с преимущественным применением гербицидов группы бетаналов в щелочной среде были малоэффективными (62–70%). Смеси гербицидов группы бетаналов с Пилотом или Карибу более активно подавляли сорную растительность (75–86%). Снижение урожайности культуры из-за повышенной засоренности посева составило 28.2–51.8%.

Установлено, что подкисление воды со щелочностью 9.0 и 10.0 ед. рН ортофосфорной кислотой до 6.0 ед. повышало биологическую эффективность гербицидов на 10–25%, но не обеспечивало уровня эффективности, полученной в контроле с водой с величиной рН 7.0 (табл. 5). Аналогичные результаты получены при использовании подкислителя ДМП Контрол.

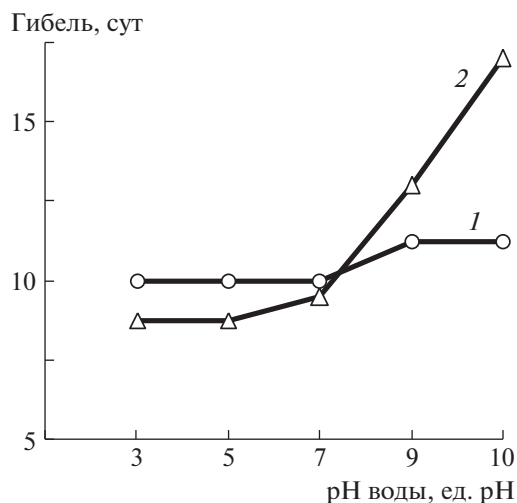


Рис. 3. Период летального действия препарата Пантера на однолетние злаковые сорняки в фазе начала кущения в зависимости от величины рН воды при задержке внесения раствора на 6 ч: 1 – Пантера, 1.0 л/га; 2 – Пантера, 1.0 л/га + Бетанал Прогресс ОФ, 1.5 л/га (2017–2018 гг.).

Использование в качестве подкислителей микрокристаллических удобрений, имеющих сильную кислую реакцию, давало некоторый положительный эффект при коррекции рН растворов. Однако при коррекции агрохимикатами растворов с рН 9.0 отмечали снижение биологиче-

Таблица 4. Влияние различных комбинаций гербицидов и кислотности использованной воды на продуктивность сахарной свеклы (2019–2020 гг.)

Вариант (гербициды, л/га, кг/га)	Величина рН использованной воды, ед.								
	5.5 (скорректирована ортофосфорной кислотой)			7.6 (речная вода)			9.8 (скорректирована Na ₂ CO ₃)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1. Контроль с ручной прополкой (обработано водой с указанным рН)	45.7	19.3	8.82	44.8	19.2	8.60	43.1	19.3	8.70
2. БЭОФ, 1.2 (1-е внесение) + Бетанал 22, 1.3 + Пантера, 1.0 (2-е внесение) + Бетанал 22, 1.5 (3-е внесение)	43.2	19.0	8.21	43.5	19.2	8.35	21.8	19.2	4.19
3. БЭОФ, 1.0 + Пилот, 1.5 (1-е внесение) + БМП, 1.5 + Пилот, 1.5 + Пантера, 1.0 (2-е внесение) + Бетанал 22, 1.5 (3-е внесение)	46.0	19.1	8.79	47.2	18.9	8.92	32.2	19.4	6.25
4. БЭОФ, 1.0 + Карибу, 0.03 (1-е внесение) + БМП, 1.8 + Карибу, 0.03 + Пантера, 1.0 (2-е внесение) + Бетанал 22, 1.5 (3-е внесение)	43.9	19.3	8.47	44.6	19.1	8.52	29.1	19.0	5.53
НСР ₀₅	4.3	0.5		4.3	0.5		4.3	0.5	

Примечание. В графе 1 – урожайность, т/га, 2 – сахаристость корнеплодов, %, 3 – сбор сахара, т/га.

Таблица 5. Эффективность гербицидов в зависимости от величины pH использованной воды и подкисления ее ортофосфорной кислотой (2016 г.)

Гербицид, л/га	Время удержания препарата в растворе до его применения, ч	Величина pH, ед.				
		7.0	9.0	10.0	Подкисление с pH 9.0 до pH 6.0	Подкисление с pH 10.0 до pH 6.0
		эффективность гибели сорняков, %				
Бетанал Эксперт ОФ, 1.0	1–1.5	96	78	54	86	83
Бицепс Гарант, 1.0	1–1.5	91	68	41	80	68
Виктор, 1.0	1–1.5	93	85	74	90	84
Бетанал 22, 1.0	1–1.5	97	80	66	89	85

Примечание. Контроль: сорняки – 550 шт./м².

ской эффективности гербицидов в сравнении с контролем (pH воды 7.2). При подкислении отмечали помутнение воды и появление в ней взвеси, которая очень медленно оседала. Подобное явление при подкислении агрохимикатами сильно-щелочных растворов гербицидов могло быть связано с повышенной минерализацией смеси. Близкий результат был получен при подкислении раствора гербицида ЭДТА, используемой для смягчения воды и в производстве хелатов (табл. 6).

Кальцинированная сода наиболее заметно снижала эффективность действия гербицидов на сорную растительность. Меньшее влияние оказывал отбеливатель “Бос”, тогда как моющее средство “Миф” существенно не влияло на биологическую активность гербицидов группы бетаналов, примененных сразу после приготовления раствора.

Таблица 6. Эффективность гербицидов в зависимости от величины pH использованной воды и микрокристаллических хелатных удобрений Нутриванта и Мастера, а также ЭДТА в борьбе с сорняками на сахарной свекле (2016–2018 гг.)

Гербицид, л/га	Величина pH, ед.		
	7.2	8.3	9.0
	эффективность гибели сорняков, %		
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2	98	95	83
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2 + Нутривант, 2.0	98	98	92
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2 + Мастер, 2.0	98	97	—
Бетанал Эксперт ОФ, 1.2 + ЭДТА, 2.0	98	96	94

Примечание. Контроль: сорняки – 320 шт./м².

При показателе щелочности воды pH 9.8 негативное влияние моющих средств на эффективность гербицидов нарастало, особенно при задержке применения растворов. Тем не менее, характер влияния моющих средств на эффективность действия гербицидов не изменялся. По степени снижения активности действия гербицидов группы бетаналов на сорняки моющие средства ранжировались в порядке: кальцинированная сода > отбеливатель “Бос” > моющее средство “Миф”. Задержка применения гербицидов на 10 ч после приготовления их на воде, загрязненной кальцинированной содой или отбеливателем “Бос”, приводила почти к полной потере активности гербицидов группы бетаналов на сорняки. В аналогичном случае моющее средство “МИФ” оказывало меньшее влияние на регуляцию численности сорняков этой группой гербицидов (табл. 7).

Стиральные средства разных производителей (Лоск, Сорти, Миф) сильно не различались по степени влияния на эффективность гербицидов группы бетаналов (табл. 8). Эффективность гербицидов в растворах со щелочностью pH 9.0, созданной стирающими средствами типа “Лоск”, “Сорти” и др., заметно не отличалась от их эффективности в растворе с pH 7.5 (речная вода) при условии применения растворов не позднее 2-х ч после приготовления.

Эффект ослабления реакции гербицидов группы бетаналов на щелочность стиральных средств (Лоск, Сорти, МИФ), скорее всего был вызван наличием в этих моющих средствах поверхностно-активных веществ и смягчителей жесткости воды.

Возможно, эффективность действия гербицида зависела от отрезка времени, достаточного для проникновения активного действующего вещества в органы растения в дозе, эффективной для уничтожения сорняков. Например, есть мнение, что для большинства гербицидов необходим пе-

Таблица 7. Эффективность гербицидов в зависимости от щелочности различных моющих средств (2017 г.)

Гербицид, л/га	Величина рН, ед.						
	речная вода	Na ₂ CO ₃		стиральный порошок МИФ-автомат		отбеливатель БОС-плюс	
	7.5	8.5	9.8	8.5	9.8	8.5	9.8
	эффективность гибели сорняков, %						
Обработано через 1 ч после приготовления раствора							
Бетанал 22, 1.0	97	92	40	97	94	94	76
Бетанал Эксперт ОФ, 1.25	99	93	28	97	93	94	64
Обработано через 10 ч после приготовления раствора							
Бетанал 22, 1.0	95	86	20	94	82	88	30
Бетанал Эксперт ОФ, 1.25	97	84	13	93	75	86	15

Примечание. Контроль: сорняки – 190 шт./м² (ширица 90%).

Таблица 8. Эффективность гербицидов в зависимости от величины pH различных моющих средств (2016 г.)

Гербицид, л/га	Величина pH, ед.				
	речная вода	Na ₂ CO ₃	стиральный порошок		
			Лоск	Сорти	Миф
	7.5	9.0	9.0	9.0	9.0
эффективность гибели сорняков, %					
Обработано через 2 ч после приготовления раствора					
Бицепс Гарант, 1.2	94	83	95	92	93
Бифор Прогресс, 1.2	94	86	94	93	96
Бетанал 22, 1.0	97	91	96	95	96
Бифор 22, 1.0	96	88	95	95	94

риод 6 ч для накопления летальной дозы в органах сорных растений [7]. Поэтому в щелочной среде бетаналы с периодом полураспада действующих веществ 7–30 мин не накапливали активное действующее вещество в тканях растений и более того, продукты распада компонентов гербицидов группы бетаналов могли блокировать в листьях механизм проницаемости для других относительно устойчивых к щелочной среде гербицидов.

ВЫВОДЫ

1. Гербициды группы бетаналов в регламентированных нормах расхода сохраняли высокую активность в кислой и нейтральной среде независимо от времени задержки обработки сорняков (до 12 ч). В слабощелочной воде (pH 8.0–8.2) гербициды, обладая кислой реакцией, способны снижать pH рабочего раствора в сторону оптимальной кислотности. В этом случае для эффективной борьбы с сорняками применяли свежеприготов-

ленные растворы гербицидов. Гербициды группы бетаналов в форме концентрата эмульсии с увеличением щелочности воды до pH 9.0 снижали биологическую эффективность на 20–40%, при щелочности pH 10.0 – на 50–60%. Свежие растворы препаратов Бетанал максПро и Бельведер были более активны в щелочной среде. При задержке обработки сорняков на 10–12 ч эффективность растворов гербицидов группы бетаналов, приготовленных на воде с pH 9.0–10.0 снижалась на 40–100%.

2. Гидрокарбонатная щелочность воды в отличие от карбонатной и гидратной щелочности оказывала наименьшее влияние на активность гербицидов группы бетаналов, т.к. гидрокарбонатная щелочность в природе не превышает показатель pH 8.2. Природной воде, отличающейся высокой жесткостью, свойственна карбонатная щелочность, которая оказывала наибольшее влияние на активность гербицидов группы бетаналов. Гидратная щелочность была не менее

разрушительна для гербицидов, как и карбонатная щелочность, но в природе она встречается в редких случаях. Щелочные растворы гербицидов группы бетаналов были особенно малоэффективны в условиях жаркой погоды и высокой инсоляции солнца. Задержка с обработкой сорняков гербицидами усиливала отрицательный эффект от применения щелочных растворов.

3. Гербициды Пилот, Карибу слабо реагировали на кислотно-щелочной показатель воды. Они активно подавляли вегетирующие сорняки в фазе семядоли—2 пары настоящих листьев независимо от величины pH использованной воды и времени задержки его внесения. Самостоятельное применение Пирамина Турбо на вегетирующих сорняках было малоэффективным. Угнетенные после обработки щелочным раствором гербицида сорняки через 5–6 сут возобновляли рост. Препарат Лонтрел 300 активнее подавлял сорняки растворами с кислой реакцией воды, чем щелочной. Несколько сокращался период летального действия на осоты, однако в итоге в вариантах опыта отмечали 100%-ную гибель сорняков независимо от времени задержки внесения препарата и pH использованной воды. В разных погодных условиях препарат Раундап эффективно уничтожал активно растущие (высотой 15–25 см) злаковые и двудольные сорняки (однолетние и многолетние) кислыми, нейтральными и щелочными растворами препарата. В условиях жаркой сухой погоды кислые растворы Раундапа были эффективнее в борьбе с засоренностью смешанного типа, но конечным результатом во всех вариантах опыта была 100%-ная гибель сорняков.

4. Кислотно-щелочная реакция воды не оказывала существенного влияния в полевых условиях на эффективность самостоятельно (отдельно от других) примененных граминицидов (препаратов Пантера, Фюзилад Форте, Центурион). Противозлаковые гербициды не теряли активности при короткой или продолжительной задержке применения их растворов. В сильных щелочных растворах препарат Лонтрел 300 и исследованные граминициды, примененные в смеси с гербицидами группы бетаналов, снижали активность действия на сорняки, в результате чего возрастал период летального воздействия гербицидов, особенно при задержке применения смеси в посеве культуры. В условиях сухой жаркой погоды возрастала устойчивость сорняков к действию щелочного раствора смеси гербицидов.

5. Использованная вода различной кислотности не оказывала существенного влияния на продуктивность сахарной свеклы, тогда как растворы гербицидов, приготовленные на щелочной воде,

заметно снижали урожайность корнеплодов. Схемы с преимущественным применением гербицидов группы бетаналов в щелочной среде были малоэффективными (62–70%). Смеси гербицидов группы бетаналов с препаратами Пилот или Карибу более активно подавляли сорную растительность (75–86%). Снижение урожайности культуры из-за повышенной засоренности посева составило 28.2–51.8%.

6. Подкисление воды со щелочностью pH 9.0 и 10.0 ортофосфорной кислотой до pH 6.0 повышало биологическую эффективность гербицидов группы бетанала на 10–25%, но не обеспечивало уровня эффективности, полученной в контроле на воде с pH 7.0. Близкие результаты получили при коррекции кислотности воды микрокристаллическими удобрениями (АгроМастер (18.18.18 + 3) 2.0 кг/га или Нутривант 2.0 кг/га) или ЭДТА 2.0 кг/га в баковой смеси с Бетаналом Эксперт ОФ 1.2 кг/га на воде с pH 9.0. Появление взвеси в растворе при подкислении микрокристаллическими удобрениями возможно было связано с повышенной минерализацией смеси.

7. При показателе щелочности воды pH 9.0–9.8 кальцинированная сода наиболее заметно снижала эффективность действия гербицидов группы бетаналов на сорную растительность. Меньшее влияние на гербициды оказывал отбеливатель “Бос”, тогда как моющее средство “Миф” существенно не влияло на биологическую эффективность гербицидов, примененных сразу после приготовления раствора. Эффект ослабления реакции гербицидов группы бетаналов на щелочность стиральных средств (Лоск, Сорти, Миф), скорее всего был вызван наличием в этих моющих средствах поверхностно-активных веществ и смягчителей жесткости воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Врочинский К.К. Стабильность пестицидов в воде // Химия в сел. хоз-ве. 1981. № 10. С. 43–45.
2. Орлин Н.А., Королева А.В. Особенности практического применения гербицидов // Усп. совр. естествознания. 2013. № 4. С. 161–162.
3. Ларина Г.Е., Захаров С.А., Захарова Т.А. Приготовление рабочих растворов сульфонилмочевинных гербицидов // Защита и карантин раст. 2003. № 2. С. 49.
4. Спиридонов Ю.Я., Каракотов С.Д., Никитин Н.В. Влияние качества воды, используемой при приготовлении рабочих растворов, на биологическую активность препарата Спрут Экстра, ВР // Агрохимия. 2014. № 6. С. 62–68.
5. Хорошкин А.Б. Почему не работают пестициды // Современные агрохимикаты. Краснодар: Агромастер, 2015. С. 89–91.

6. Спиридонов Ю.Я., Никитин Н.В. Глифосатсодержащие гербициды — особенности технологии их применения в широкой практике растениеводства // Вестн. защиты раст. 2015. № 4(86). С. 5–11.
7. Куликова Н.А., Лебедева Г.Ф. Гербициды и экологические аспекты их применения. М.: Кн. дом “Либроком”, 2010. 152 с.
8. Лепешкин И.В., Медведев В.И., Гринько А.П. Токсиколого-гигиеническая оценка и регламентация применения гербицидов на основе диметил-аминной соли и 2-этилгексилового эфира 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты для защиты зерновых злаковых культур и кукурузы // Сучасні проблеми токсикології харчової та хімічної безпеки. 2014. № 5. С. 7–13.
9. Кузнецова Е.М., Чміль В.Д. Глифосат: поведение в окружающей среде и уровни остатков // Совр. пробл. токсикол. 2010. № 1. С. 87–95.
10. Селезнева А.В., Селезнев В.А. От локального мониторинга к регулированию сброса загрязняющих веществ в водные объекты // Водн. хоз-во России. Екатеринбург, 2008. № 2. С. 4–21.
11. Дворянкин Е.А. Качество и эффективность рабочих растворов гербицидов группы бетанала // Сахар. свекла. 2013. № 8. С. 33–38.

Effect of Beet Herbicides on Weed Plants in Sugar Beet Fields Depending on pH of Water Used and Its Pollution with Detergents

E. A. Dvoryankin

*A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar,
VNIISS 86, Ramonsky district, Voronezh region 396030, Russia*

E-mail: dvoryankin149@gmail.com

In field tests at the VNIISS experimental field in 2016–2020, the effectiveness of individual beet herbicides on weeds was studied depending on the pH value of the water used to prepare the working solution. It is shown that the activity of herbicides of the betanal group decreased most strongly in an alkaline environment. The reaction of herbicides of the betanal group to the alkalinity of water depended on the preparative form of the herbicide, the duration of the application of the solution and weather conditions. Detergents, as water pollutants, according to the degree of decrease in the activity of herbicides on weed plants were ranked in the order: soda ash > bleach “Bos” > detergents “Myth”, “Sorti”, etc. It has been established that the critical pH of water for the working solution of herbicides of the betanal group is 8.0–8.2, provided that it is used immediately after preparation. When using water with a pH > 8.0–8.2, it is necessary to correct it to a pH of 5.5–6.5 with appropriate acidic substances. Herbicides Pilot, Caribou, Roundup, Lontrel 300, Panther, Centurion, Fusilade Forte were more resistant to alkaline environment than herbicides of the betanal group.

Key words: sugar beet, weeds, herbicides, biological efficiency, water acidity, detergents.

УДК 632:631.811:633.16(470.2)

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА ФИТОСАНИТАРНУЮ ОБСТАНОВКУ В ПОСЕВАХ ЯРОВОГО РАПСА НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РФ

© 2022 г. А. М. Шпанев^{1,2,*}, М. А. Фесенко¹

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

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

*E-mail: ashpanev@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.

После доработки 30.03.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Изучили влияние минерального питания на фитосанитарную обстановку в посевах ярового рапса на Северо-Западе России, где внесение удобрений — обязательное условие рентабельного сельскохозяйственного производства. По результатам исследования определено, что предпосевное внесение минеральных удобрений приводило в основном к отрицательным изменениям в фитосанитарном состоянии посевов ярового рапса. Наблюдали увеличение засоренности посевов малолетними видами сорных растений, прежде всего, марью белой, пикульниками и дымянкой аптечной, поврежденности листьев гусеницами капустной совки, капустной и репной белянок, усиление развития альтернариоза и склеротиниоза. Положительные изменения были связаны со снижением поврежденности листового аппарата растений рапса гусеницами капустной моли и личинками минирующих мух. Таким образом, на фоне внесения средних и высоких доз минеральных удобрений повышались риски потерь урожая рапса от сорной растительности и болезней, а следовательно, проведение защитных обработок с использованием гербицидов и фунгицидов становится более востребованным.

Ключевые слова: яровой рапс, фитосанитарная обстановка, сорные растения, крестоцветные блошки, капустная моль, альтернариоз, минеральные удобрения.

DOI: 10.31857/S0002188122080130

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в структуре посевных площадей Северо-Западного региона произошли значительные изменения. В частности, увеличились посевные площади ярового рапса, главным образом, за счет Псковской, Новгородской и Ленинградской обл. По данным Росстата, в 2018 г. посевные площади ярового рапса в указанных областях составили 7.19, 3.65 и 1.67 тыс. га, тогда как в 2015 г. — 0.30, 0.03 и 0.36 тыс. га соответственно. Подобного интереса у сельхозпроизводителей к данной культуре не отмечалось никогда ранее. Он обусловлен высокой рентабельностью, большими экспортными возможностями, использованием полученного урожая как в кормопроизводстве, так и на технические цели, а также важным агро-техническим и фитосанитарным значением для последующих культур в севообороте [1–3].

На фоне стремительного роста посевных площадей ярового рапса обозначилась проблема недостаточной изученности влияния минерального питания на фитосанитарную обстановку в посевах этой культуры. С учетом того, что рентабельное возделывание рапса в Северо-Западном регионе возможно только при условии внесения удобрений, эти сведения представляются актуальными, имеющими теоретическую и практическую значимость. При этом известно, что применение высоких доз минеральных удобрений под посев рапса может быть не целесообразным, т.к. не окупается соответствующими прибавками урожая [4].

Анализ литературных данных показал, что влияние внесения минеральных удобрений распространяется на разные группы вредных организмов, трофически связанных с яровым рапсом. Например, применение азотных удобрений (N33) в условиях Приобской лесостепи способствовало

снижению численности рапсового цветоеда (на 33%) в фазе бутонизации рапса, густоты (на 18%) и биомассы (на 54%) сорных растений на момент уборки урожая [5]. При этом эффективность гербицидной обработки была выше на удобренном фоне (94–95%), чем на неудобренном (85–88%). В Центральном регионе усиленное азотное питание (N50 и N100) способствовало повышению засоренности посевов ярового рапса малолетними видами сорных растений (на 10.9–16.0%) и снижению засоренности многолетниками (на 3.2–35.3%) [6]. Схожие закономерности прослежены при внесении полного минерального удобрения (N30P45K40). По данным учетов, проведенных перед уборкой ярового рапса, отмечено увеличение количества малолетних сорных растений на 24.4 и уменьшение численности многолетних на 26.1% [7]. В Ставропольском крае внесение под посев ярового рапса N60P55K30 приводило к снижению численности крестоцветных блошек (на 18%), рапсового цветоеда (на 28%) и заселенности растений капустной тлей (на 1.7 балла) [8].

Цель работы — изучение влияния минерального питания на фитосанитарное состояние посевов ярового рапса на Северо-Западе России, где применение удобрений является непрямым условием рентабельного сельскохозяйственного производства.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического НИИ, расположенного в Гатчинском р-не Ленинградской обл., в период 2012–2020 гг. Почва опытных полей стационара — дерново-слабоподзолистая супесчаная, 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. Стационар представляет собой 7-польный зерно-травянопропашной севооборот, в котором предшественниками ярового рапса в разные годы были картофель (2012–2017 гг.) и многолетние травы (2018–2020 гг.).

Одним из изученных факторов в схеме опыта, развернутого на полях севооборота во времени и пространстве, был уровень минерального питания, сформированный предпосевным внесением азофоски и аммиачной селитры. В варианте с высоким уровнем минерального питания доза удобрений составляла N100P75K75, средним — N65P50K50, низким — удобрения не вносили.

Площадь делянок в каждом из вариантов удобренности составляла 0.18 га, площадь одного поля

севооборота — 0.60 га. Повторность в опыте трехкратная.

Технология возделывания ярового рапса включала последовательное проведение зяблевой вспашки, весеннего боронования, внесения удобрений, предпосевной культивации, посева и уборки урожая. Мероприятия по защите растений рапса от вредных организмов не проводили. Высевали сорт ярового рапса Оредеж 4, районированный в Северо-Западном регионе с 2005 г.

Для оценки фитосанитарного состояния посевов ярового рапса использовали методику постоянных учетных площадок 0.1 м², с их стационарным размещением на протяжении всего периода вегетации [9]. В каждом варианте минерального питания устанавливали 12 постоянных площадок, всего на поле — 36. 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.

Для определения численности капустной моли и рапсового цветоеда проводили кошения энтомологическим сачком, начиная с фазы розетки листьев и до полной спелости семян рапса. Делали по 10 взмахов в 3-х местах в каждом из вариантов удобренности.

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica 6.0, применив метод дисперсионного анализа для выявления достоверных различий в фитосанитарном состоянии посевов ярового рапса, размещенных в вариантах с разным уровнем минерального питания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комплекс сорных растений, встречающихся в посеве ярового рапса, насчитывал 46 видов. Самыми многочисленными оказались марь белая (*Chenopodium album* L.), фиалка полевая (*Viola arvensis* Murr.), пикульники (*Galeopsis* spp.), торица полевая (*Spergula arvensis* L.), пастушья сумка обыкновенная (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.) и дымянкa аптечная (*Fumaria officinalis* L.). Среди многолетников лидирующие позиции занимал осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), в отдельные годы наблюдали высокую численность пырея ползучего (*Elitrigia repens* (L.) Nevski), мать-и-мачехи обыкновенной (*Tussilago farfara* L.), чистеца болотного (*Stachys palustris* L.), шавеля малого (*Rumex acetosella* L.).

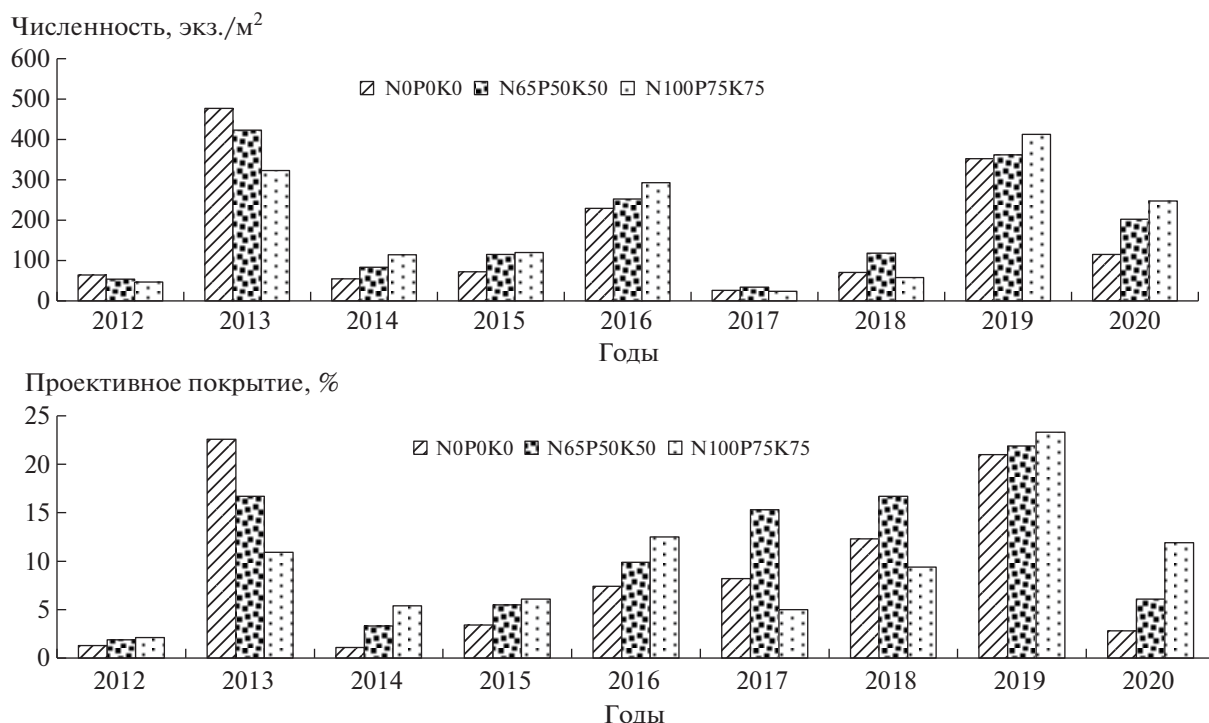


Рис. 1. Влияние минерального питания на начальную засоренность посевов ярового рапса.

Малолетний тип засоренности являлся преобладающим. На протяжении всего периода исследования, за исключением 2013 г., на долю малолетников приходилось 89.1–98.4% от общей численности сорных растений. В 2013 г. в посеве ярового рапса отмечен сложный тип засоренности с высокой долей присутствия корнеотпрысковых и корневищных видов с многолетним циклом развития. Долевое участие малолетних видов сорных растений составляло 63.2%.

На протяжении большинства лет исследования в посеве ярового рапса фиксировали сильную степень засоренности, когда в фазе 2-х настоящих листьев культуры насчитывалось 258–408 экз./м² сорных растений, а проективное покрытие составляло 9.5–22.1%. Слабая степень засоренности отмечена в 2012, 2014, 2015 и 2020 гг., когда численный состав сорных растений варьировал в пределах 55–188 экз./м², а проективное покрытие – от 1.8 до 6.9%.

Влияние минерального питания на засоренность посевов ярового рапса в большинстве случаев (2014, 2015, 2016, 2019 и 2020 гг.) проявлялось в увеличении численности и проективного покрытия сорных растений в начальный период развития агрофитоценоза (рис. 1). Оно составляло 1.4 и 1.7 раза по численности, 1.8 и 2.8 раза – по проективному покрытию соответственно в вари-

антах с внесением повышенной (N65P50K50) и высокой (N100P75K75) доз удобрений. При этом различия в засоренности между средним и высоким уровнями минерального питания составили 1.2 и 1.5 раза и даже получили статистическое подтверждение в отдельные годы.

В 2013 г. при значительной доле многолетних сорных растений в посеве ярового рапса была иная ситуация, когда в вариантах с внесением минеральных удобрений отмечали снижение численности (с 477 до 423 и 323 экз./м²) и проективного покрытия (с 22.6 до 16.7 и 10.9%) сорных растений. По итогам анализа данных всего периода исследования, оказалось, что многолетние двудольные виды в большей численности произрастали на удобренных делянках опыта, а малолетние двудольные, как более требовательные к содержанию основных элементов питания в почве – на удобренных (табл. 1). В большей степени это относилось к мари белой, пикульникам и дымянки аптечной, тогда как торица полевая и редька дикая преимущественно произрастали в варианте, где не было предусмотрено внесение минеральных удобрений.

Согласно биологическим особенностям, яровой рапс обладает слабой конкурентоспособностью на начальных фазах развития и достаточно выраженным влиянием на сорную раститель-

Таблица 1. Влияние минерального питания на фитосанитарное состояние посевов ярового рапса на Северо-Западе России (Ленинградская обл., 2012–2020 гг.)

Показатели	Уровень минерального питания			HCP ₀₅
	низкий N0P0K0	средний N65P50K50	высокий N100P75K75	
Сорные растения				
Густота стояния в фазе 2-х настоящих листьев, экз./м ²	209	225	207	23
многолетних злаковых	4	5	9	4
многолетних двудольных	51	24	17	12
малолетних злаковых	0.2	0.3	1.0	0.1
малолетних двудольных	154	196	180	20
Проективное покрытие в фазе 2-х настоящих листьев, %	9.7	10.8	9.3	1.7
Густота стояния в фазе полной спелости, экз./м ²	262	182	169	34
Фитомасса в фазе полной спелости, г/м ²	273	438	423	90
Масса 1-го сорного растения в фазе полной спелости, г	1.04	2.41	2.50	0.69
Крестоцветные блошки				
Численность в фазе всходов, экз./м ²	11	15	20	5
Поврежденность листьев в фазе всходов, %	68.0	72.3	72.7	0.8
Интенсивность повреждения, %	15.7	17.5	17.3	0.9
Поврежденность листьев в фазе 2-х настоящих листьев, %	52.8	53.5	55.4	2.2
Интенсивность повреждения, %	29.2	30.2	30.0	1.3
Капустная моль				
Поврежденность листьев в фазе цветения, %	39.9	33.4	37.7	2.2
Интенсивность повреждения, %	35.3	26.9	28.7	3.4
Поврежденность соцветий в фазе цветения, %	25.5	2.5	4.8	4.7
Капустная белянка, капустная совка, репная белянка				
Поврежденность листьев в фазе цветения, %	2.5	6.5	7.7	0.8
Интенсивность повреждения, %	27.7	24.8	17.1	6.8
Минирующие мухи				
Поврежденность листьев в фазе цветения, %	1.5	0.6	0.2	0.2
Интенсивность повреждения, %	50.3	39.0	32.7	3.0
Рапсовый цветоед				
Численность в фазе бутонизации, имаго/10 взм.	30.3	38.2	32.9	3.9
Численность в фазе налива семян, лич./10 взм	28.6	31.6	27.3	3.5
Семенной скрытнохоботник				
Поврежденность стручков в фазе полной спелости, %	0.08	0.22	0.19	0.3
Альтернариоз				
Пораженность стручков в фазе желтой спелости, %	78.1	79.8	83.5	2.4
Интенсивность поражения, %	18.7	26.0	26.9	2.6
Развитие, %	17.0	24.0	23.7	2.5
Склеротиниоз				
Пораженность растений в фазе желтой спелости, %	0.0	0.4	0.2	0.4

ность во второй половине вегетации [10]. Под действием удобрений отмечали усиление фитоценотического давления со стороны культурных растений, что приводило к снижению численности сорняков в удобренных вариантах

(18.4–19.1%) и в то же время увеличению их вегетативной массы (в 2.3–2.4 раза).

Основными вредителями ярового рапса на Северо-Западе России являются крестоцветные блошки, капустная моль и рапсовый цветоед. По-

врежденность всходов рапса крестоцветными блошками варьировала по годам в пределах 13.0–97.5%, интенсивность повреждения — 5.7–32.8% при численности 5–30 особей/м². Ситуация значительно усугублялась в жаркую засушливую погоду, когда интенсивность питания блошек возрастала, а рост и развитие растений рапса замедлялись. Высокая численность популяции капустной моли и сильное повреждение растений ярового рапса отмечены в 2013, 2016, 2019 и 2020 гг. [11]. Максимальная численность гусениц капустной моли в эти годы составляла 509, 315, 121 и 144 экз./10 взм. сачком или в пересчете на одно растение при 100%-ном заселении — 1.9, 3.3, 0.3, 0.7 особей. Интенсивность повреждения листового аппарата гусеницами достигала 70–75%, что приводило к массовой гибели растений, а доля растений с уничтоженными соцветиями была равна 40%. Численность жуков рапсового цветоеда в фазе бутонизации рапса варьировала по годам от 13 до 68 особей/10 взм. сачком или от 0.1 до 0.5 особей/растение, что не превышало экономический порог вредоносности вредителя, равный 2 особям/растение [12].

Ранее было отмечено, что крестоцветными блошками сильнее заселялись и повреждались всходы рапса на удобренных участках посева [13]. Вероятно, это было связано с ранним и более дружным появлением всходов культурных растений, типичном для удобренных делянок. В то же время в фазе 2-х настоящих листьев рапса достоверные различия в поврежденности блошками листовой поверхности между удобренными и неудобренными вариантами уже отсутствовали.

По результатам анализа многолетних данных подтвердилось обозначенное ранее значительно более сильное повреждение гусеницами капустной моли листовой поверхности растений ярового рапса в варианте с низким содержанием в пахотном слое основных элементов питания [14]. Внесение полного минерального удобрения в дозах N65P50K50 и N100P75K75 за счет лучшего развития растений рапса приводило к снижению общей степени повреждения листьев на 18.7–23.8%. В отдельные годы различия между вариантами были более выражены и составляли 33.6–49.1 (2012 г.) и 42.3–44.9% (2013 г.). При этом уменьшалась доля растений в посеве с уничтоженными соцветиями в 5.3 и 10.2 раза. Достоверные различия в поврежденности листьев и соцветий гусеницами капустной моли между средне- и сильноудобренными делянками отсутствовали.

Полученный экспериментальный материал не позволил сделать однозначный вывод о влиянии минерального питания на заселенность посевов

ярового рапса рапсовым цветоедом. Наиболее высокая численность имаго и личинок вредителя выявлена в варианте со средней дозой внесения полного минерального удобрения. В то же время, по данным 2017 и 2018 гг., отмечено статистически значимое снижение числа особей рапсового цветоеда на удобренных участках посева, которое составило 1.3–1.6 и 1.1–1.3 раза (имаго), 1.3–4.0 и 1.8–2.8 раза (личинки) соответственно в вариантах N65P50K50 и N100P75K75.

К числу второстепенных вредителей ярового рапса относятся минирующие мухи (*Agromyzidae*), капустная совка (*Mamestra brassicae* L.), капустная (*Pieris brassicae* L.) и репная (*Pieris rapae* L.) белянки, рапсовый пилильщик (*Athalia rosae* L.), капустная тля (*Brevicoryne brassicae* L.) и семенной скрытнохоботник (*Ceuthorrhynchus* spp.).

Повреждения листьев, характерные для гусениц капустной совки, капустной белянки и репной белянки, чаще встречались на удобренных участках посева ярового рапса, тогда как минирование листьев чаще выявлялось в неудобренном варианте. Семена ярового рапса в большей степени повреждались личинками семенного скрытнохоботника в удобренных вариантах. Видимо, это объясняется соответствующими особенностями микроклимата, которые имеют определяющее значение при выборе насекомыми мест питания и откладки яиц.

Основным заболеванием ярового рапса в Северо-Западном регионе является альтернариоз (*Alternaria brassicae* Sacc.), реже встречаемый с выраженной очаговостью распространения в посеве — склеротиниоз (*Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary). Согласно полученным данным, благоприятные условия для развития альтернариоза складывались на удобренных участках посева, где культурные растения достигали большей высоты и массы, из-за худшей продуваемости и освещенности на них дольше задерживалась влага. По сравнению с неудобренным вариантом, развитие данного заболевания увеличивалось с 17.0 до 23.8–24.0% или в 1.4 раза. Очаги присутствия склеротиниоза на протяжении всего периода исследования встречались исключительно в вариантах со средним и высоким уровнем минерального питания. Доля пораженных растений в посеве составила 0.4 и 0.2% соответственно при внесении N65P50K50 и N100P75K75.

Анализ урожайности и основных элементов структуры урожая ярового рапса выявил отрицательный эффект со стороны высокой дозы минеральных удобрений, который усугублялся на фоне фитосанитарных последствий. Он проявлялся

Таблица 2. Влияние минерального питания на урожайность и элементы структуры урожая ярового рапса на Северо-Западе России

Показатель	Уровень минерального питания			HCP_{05}
	низкий N0P0K0	средний N65P50K50	высокий N100P75K75	
Урожайность, ц/га	9.1	11.9	10.4	1.7
Густота продуктивных растений, шт./м ²	126	169	144	18
Число стручков с растения, шт./растение	15.1	19.0	21.1	2.5
Число семян с растения, шт./растение	250	290	288	45
Масса семян с растения, г/растение	0.73	0.77	0.75	0.13
Масса 1000 семян, г	3.5	3.0	2.7	0.2

в снижении густоты всходов по сравнению с дозой удобрений N65P50K50 (221 против 231 экз./м²), и густоты продуктивного стеблестоя (144 против 169 экз./м²). Внесение средней дозы обеспечивало повышение густоты растений рапса как на момент появления всходов (на 6.9%), так и при уборке урожая (на 34.1%), а также продуктивности растений (на 16%). При этом хозяйственный эффект выражался прибавкой урожая 2.8 ц/га или на 30.8% (табл. 2).

Увеличение дозы удобрений с N65P50K50 до N100P75K75 не приводило к росту урожая рапса на протяжении всех лет исследования, за исключением 2018 г., что указывало на нецелесообразность сильной удобренности этой культуры. Невысокая фактическая величина полученной урожайности ярового рапса являлась следствием напряженной фитосанитарной обстановки и предполагаемых больших потерь урожая от деятельности вредных организмов в отсутствии защитных мероприятий. Подтверждением были полученные данные о величине сохраненного урожая при применении интегрированной системы защиты рапса, равной 10.4 ц/га (90%), в годы массового размножения капустной моли – 9.6 ц/га (213%), сильного развития альтернариоза – 14.6 ц/га (248%) [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предпосевное внесение минеральных удобрений приводило в основном к отрицательным изменениям в фитосанитарном состоянии посевов ярового рапса. Наблюдали увеличение засоренности посевов ярового рапса малолетними видами сорных растений, прежде всего, марью белой, пикульниками и дымянкой аптечной. Оно отражалось на численном составе, проективном покрытии и формировании надземной массы сорных растений. В то же время сни-

жалась засоренность посевов торицей полевой и редькой дикой, которые предпочитали кислую реакцию почвенного раствора. Кроме этого, отмечали усиление поврежденности листьев гусеницами капустной совки, капустной и репной белянок, а также развития альтернариоза и склеротиниоза. Положительные изменения были связаны со снижением поврежденности листового аппарата растений рапса гусеницами капустной моли и личинками минирующих мух.

Таким образом, на фоне внесения средних и высоких доз минеральных удобрений повышались риски потерь урожая рапса от сорной растительности и болезней, а следовательно, проведение защитных обработок с использованием гербицидов и фунгицидов становится более востребованным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абуова А.Б. Влияние ярового рапса на урожайность и отдельные показатели качества зерна яровой пшеницы // Вестн. Ульяновск. ГСХА. 2012. № 3(19). С. 4–8.
2. Васильев А.А. Влияние сидератов на фитосанитарное состояние агроэкосистем картофеля // Перм. аграрн. вестн. 2014. № 3(7). С. 3–10.
3. Юшкевич Л.В., Щитов А.Г., Пахотина И.В. Агротехнические особенности формирования продуктивности яровой пшеницы после рапса в лесостепи Западной Сибири // Вестн. Ульяновск. ГСХА. 2021. № 4(56). С. 46–52.
4. Мокрушина А.В., Богатырева А.С., Акманаев Э.Д. Влияние минеральных удобрений на семенную продуктивность и биохимический состав ярового рапса в условиях Среднего Предуралья // Перм. аграрн. вестн. 2019. № 2(26). С. 87–94.
5. Стецов Г.Я., Садовников Г.Г., Садовникова Н.Н., Потапова Е.Е. Эффективность химической защиты посевов ярового рапса в условиях Лесостепи Приобья // Вестн. АлтайГАУ. 2018. № 8(166). С. 5–11.
6. Труфанов А.М., Воронин А.Н., Исаичева У.А., Конова М.К. Фитосанитарное состояние посева яро-

- вого рапса при применении ресурсосберегающих агротехнологий // Вестн. АПК Верхневолжья. 2015. № 1(29). С. 22–25.
7. Гущина В.А., Токарева И.Н. Отзывчивость рапса на минеральные удобрения и средства защиты от сорняков и вредителей // Нива Поволжья. 2009. № 4(13). С. 11–17.
 8. Горбатко К.А., Демкин В.И. Экологические проблемы борьбы с капустной тлей в посевах ярового рапса // Защита и карантин раст. 2009. № 11. С. 31–32.
 9. Зубков А.Ф. Методические указания по сбору полевой биоценологической информации с целью оценки вредоносности комплекса вредных организмов. Л.: ВИЗР, 1978. 18 с.
 10. Вавкина Е.Н., Афонин Н.М., Андреева Н.В., Бобрович Л.В. Влияние сроков посева ярового рапса на засоренность и устойчивость к повреждению вредными организмами // Наука и образование. 2021. Т. 4. № 2.
 11. Шпанев А.М. Новые случаи массового размножения капустной моли // Защита и карантин раст. 2021. № 4. С. 27–30.
 12. Алехин В.Т., Михайликова В.В., Михина Н.Г. Экономические пороги вредоносности вредителей, болезней и сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур. М.: Росинформагротех, 2016. 76 с.
 13. Шпанев А.М., Мосейко А.Г. Крестоцветные блошки (*Phyllotreta* spp.; Coleoptera, Chrysomelidae) на посевах ярового рапса в Ленинградской области // Энтомол. обозр. 2021. Т. 100. № 1. С. 49–58.
 14. Шпанев А.М. Массовое размножение капустной моли // Защита и карантин раст. 2015. № 9. С. 40–42.
 15. Шпанев А.М., Фесенко М.А., Смур В.В. Эффективность применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в полеводстве севообороте на Северо-Западе РФ // Агрохимия. 2021. № 1. С. 12–22.

Influence of Mineral Nutrition on the Phytosanitary Situation in Spring Rape Crops in the North-West of the Russian Federation

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

^a Agrophysical Research Institute

Grazhdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

^b All-Russian Institute of Plant Protection

shosse Podbel'skogo 3, Saint-Petersburg—Pushkin 196608, Russia

[#] E-mail: office@agrophys.ru

In the context of the rapid growth of the acreage of spring rapeseed, the problem of insufficient knowledge of the influence of mineral nutrition on the phytosanitary situation in these crops in the North-West of Russia, where the application of fertilizers is a prerequisite for profitable agricultural production, has emerged. According to the results of the research, it was determined that the pre-sowing application of mineral fertilizers mainly leads to negative changes in the phytosanitary state of spring rapeseed crops. Thus, there is an increase in the infestation of crops with juvenile species of weeds, primarily wild spinach, hemp-nettle and common fumitory, as well as leaf damage by caterpillars of cabbage moth, cabbage white and small white, increased development of alternaria and noble rot. Positive changes are associated with a decrease in damage of rapeseed plants leaves caused by caterpillars of the cabbage moth and larvae of leaf-miner flies. Thus, against the background of the introduction of medium and high doses of mineral fertilizers, the risks of rape crop losses from weeds and diseases increase, which means that protective treatments using herbicides and fungicides become more demanded.

Key words: spring rapeseed, phytosanitary conditions, weeds, cruciferous flea beetles, cabbage moth, alternariosis, mineral fertilizers.

УДК 631.816.12:631.811.98:633.11“321”(470.323)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕКОРНЕВЫХ ПОДКОРМОК ГУМИНОВЫМИ ПРЕПАРАТАМИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ПОЧВЕННО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2022 г. В. И. Лазарев^{1,*}, Ж. Н. Минченко¹, А. Я. Башкатов¹, Н. Н. Трутаева²

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

²Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова
305021 Курск, ул. Карла Маркса, 70, Россия

*E-mail: vla190353@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.02.2022 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Изучена эффективность использования гуминовых препаратов ЭКО-СП, Лигногумат, Гумат Калия Суфлер, Фулвигрейн Классик, Гумифул Про в качестве некорневых подкормок яровой пшеницы на черноземе типичном Курской обл. Выявлено, что обработка посевов яровой пшеницы гуминовыми препаратами в фазе кущения и фазе начало выхода в трубку увеличивала урожайность на 3.4–4.8 ц/га, повышала содержание сырой клейковины в зерне на 0.4–1.3%. При сравнении эффективности влияния отдельных гуминовых препаратов между собой на урожайность и качество зерна яровой пшеницы достоверной разницы не наблюдали, т.е. влияние изученных препаратов на урожайность и качество зерна было практически одинаковым. Эффективность использования различных видов гуминовых препаратов в качестве некорневых подкормок яровой пшеницы определялась стоимостью самих препаратов и дозами их внесения. Наиболее высокие экономические показатели обеспечивала двукратная некорневая подкормка яровой пшеницы препаратами ЭКО-СП и Фулвигрейн Классик, величина условно чистого дохода от их внесения составила 35515 и 35101 руб./га, уровень рентабельности – 134 и 131% соответственно. Экономическая эффективность применения гуминовых препаратов Лигногумат и Гумат Калия Суфлер в качестве некорневых подкормок яровой пшеницы была меньше: уровень рентабельности их использования составил 126 и 127%. Снижение экономической эффективности препарата Гумат Калия Суфлер было связано с более высокой дозой его внесения.

Ключевые слова: яровая пшеница, гуминовые препараты, ЭКО-СП, Лигногумат, Гумат Калия Суфлер, Фулвигрейн Классик, Гумифул Про, урожайность, структура урожая, содержание клейковины, септориоз, экономическая эффективность, Курская область.

DOI: 10.31857/S0002188122080117

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы биологизации земледелия возможно на принципах интегрированного экологизированного подхода, основу которого составляет преимущественное применение агротехнических, биологических, селекционных мероприятий, направленных на управление фитосанитарным состоянием посева и допускающих экологически безопасный технологический процесс [1, 2]. Такой подход базируется на адаптации к природно-антропогенным особенностям регионов и рациональном использовании природно-ресурсного потенциала агроландшафта с целью повышения качества сельскохозяйственной продукции, охраны окружающей среды и здоровья человека [3, 4].

Реализация такой концепции может быть достигнута путем совершенствования агротехники с учетом адаптивного потенциала растений, повышения эффективности естественной регуляции биологического компонента агроценозов [5–7].

Это открывает пути к разработкам и внедрению в производство агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур нового поколения с использованием биологических препаратов, регуляторов роста растений и биоудобрений, позволяющих повышать иммунитет растений к наиболее опасным возбудителям болезней, применение которых становится все более экономически выгодным и экологически целесообразным [8–10].

В настоящее время в качестве стимуляторов роста и биоудобрений широко используют гуминовые препараты – гуматы. Это группа естественных высокомолекулярных веществ, которые благодаря особенностям строения и физико-химическим свойствам характеризуются высокой физиологической активностью [11, 12]. Они не токсичны, не канцерогенны, не мутагенны и не обладают эмбриологической активностью. Гуматы активизируют метаболизм и размножение полезной почвенной микрофлоры, повышают защитный механизм растений против действия неблагоприятных физических (жара, холод), химических (засоление, тяжелые металлы, радионуклиды) и биологических (грибные, бактериальные и вирусные болезни) факторов, способствуют формированию высокого урожая сельскохозяйственных культур [13, 14].

В “Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов”, разрешенных к применению на территории Российской Федерации, на 2021 год зарегистрировано более 70 видов удобрений на основе гуминовых кислот [15]. Наиболее распространенными из них являются: Гумат калия, Гумистим, Гумат “Плодородие”, Лигногумат, Гумат Калия Суфлер, Фульвигрейн Классик, Гумифул Про, ЭКО-СП и др. Особую актуальность приобретает внедрение биологических препаратов в посевах, размещенных вблизи перерабатывающих предприятий, нуждающихся в экологически безопасном чистом сырье для производства диетического и детского питания.

Цель работы – определение эффективности некорневых подкормок удобрениями на основе гуминовых кислот яровой пшеницы, их влияние на урожайность и качество зерна в почвенно-климатических условиях Курской обл.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2019–2021 гг. в полевом опыте лаборатории технологий возделывания полевых культур Курского ФАНЦ в севообороте со следующим чередованием культур: яровой ячмень – соя – яровая пшеница. Изучали эффективность применения гуминовых препаратов Лигногумат, Гумат Калия Суфлер, Фульвигрейн Классик, Гумифул Про, ЭКО-СП в следующей схеме опыта, варианты: 1 – контроль (без обработок гуминовыми препаратами), 2 – ЭКО-СП (обработка посевов в фазе кушения, 1.2 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1.2 л/га), 3 – Лигногумат (обработка посевов в фазе кушения, 1.2 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1.2 л/га), 4 – Гумат Калия Суф-

лер (обработка посевов в фазе кушения, 2.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 2.4 л/га), 5 – Фульвигрейн Классик (обработка посевов в фазе кушения, 0.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.4 л/га), 6 – Гумифул Про (обработка посевов в фазе кушения, 0.1 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.1 л/га). Варианты в опыте располагались систематически, повторность трехкратная, учетная площадь делянки 200 м².

Почва опытного участка – чернозем типичный тяжелосуглинистого гранулометрического состава. Содержание в пахотном слое гумуса – 5.3%, щелочногидролизующего азота – 69.0, подвижного фосфора (по Чирикову) – 8.8, подвижного калия (по Чирикову) – 14.5 мг/кг, pH 5.4.

Полевые работы в опыте проводили в оптимальные сроки, сорт яровой пшеницы – Дарья, норма посева – 5.5 млн всхожих зерен/га. Способ посева – рядовой (ширина междурядий 15 см), глубина заделки семян – 4–5 см. Фон минерального питания – N30P30K30. Обработку посевов яровой пшеницы гуминовыми препаратами проводили ранцевым опрыскивателем в соответствии со схемой опыта.

В зерне яровой пшеницы определяли содержание сырой клейковины, белка, крахмала на анализаторе зерна “Инфратек-1241”, натуру зерна (ГОСТ-10840-76), массу 1000 зерен (ГОСТ-10842-76). Экспериментальные данные обрабатывали дисперсионным методом математического анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проращивания семян яровой пшеницы в лабораторных условиях показали, что гуминовые препараты способствовали повышению энергии прорастания семян (3-и сут проращивания) на 2–4%, лабораторную всхожесть (7-е сут проращивания) на 2–5%, в дальнейшем оказывали стимулирующее влияние на рост проростков. Наиболее высокими стимулирующими свойствами обладал препарат Гумифул Про (0.1 кг/т), обработка семян яровой пшеницы которым повышала энергию прорастания на 4%, лабораторную всхожесть – на 5%. Влияние гуминовых препаратов Гумат Калия Суфлер (1.5 л/т), ЭКО-СП (0.3 л/т), Лигногумат (0.5 л/т) и Фульвигрейн Классик (0.8 л/т) на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян было несколько меньше и практически равным: обработка семян яровой пшеницы этими препаратами повышала энергию прорастания на 2–3, лабораторную всхожесть – на 2–4% (рис. 1, 2).

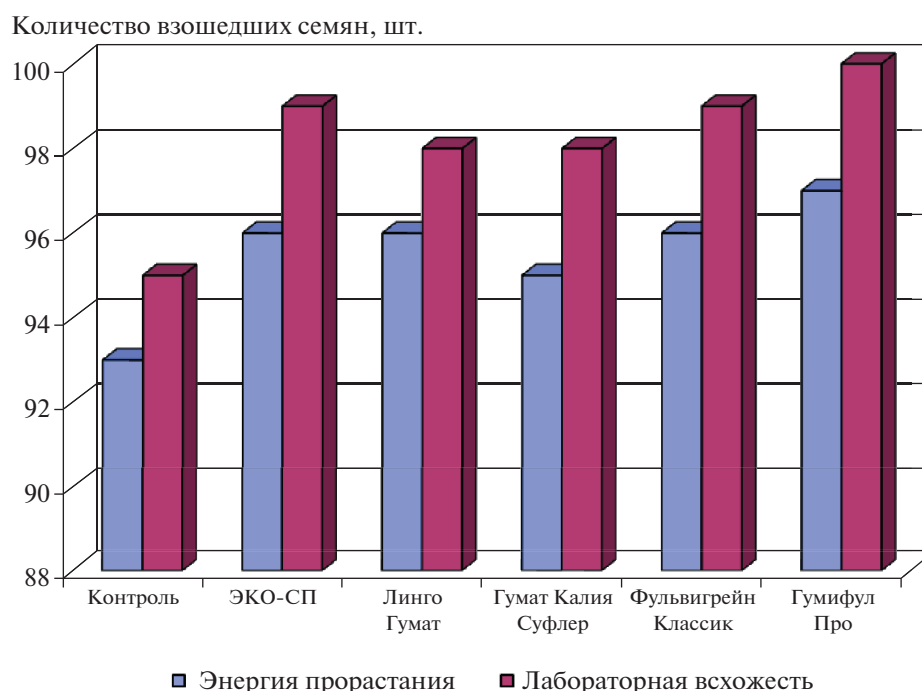


Рис. 1. Влияние гуминовых препаратов на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян яровой пшеницы (2019–2021 гг.).

Результаты проведенного полевого опыта свидетельствовали о том, что использование гуминовых препаратов в посевах яровой пшеницы способствовало лучшему росту и развитию растений, образованию более мощной вегетативной массы и корневой системы растений в сравнении с контрольным вариантом.

Обработка гуминовыми препаратами посевов яровой пшеницы в фазе кушения и фазе выхода в трубку снижала поражаемость растений септориозом (*Septoria nodorum*) на 6.6–7.8%, биологическая эффективность гуминовых препаратов составила 25.8–29.2% (табл. 1). Наиболее высокой биологической эффективностью в сдерживании развития септориоза в посевах яровой пшеницы обладали препараты Гумат Калия Суфлер (29.2%), ЭКО-СП (28.5%) и Фульвигрейн Классик (28.1%). Биологическая эффективность гуминовых препаратов Лигногумат и Гумифул Про была несколько меньше и составила 24.7 и 25.8% соответственно.

Применение гуминовых препаратов в качестве некорневых подкормок яровой пшеницы оказывало существенное влияние на урожайность и качество зерна (табл. 2). Двукратная обработка посевов повышала урожайность яровой пшеницы на 3.4–4.8 ц/га, (в контрольном варианте – 36.9 ц/га).

Более высокие прибавки урожайности яровой пшеницы обеспечивали гуминовые препарат Гу-

мат Калия Суфлер (4.8 ц/га), агрохимикат на основе гумусовых веществ ЭКО-СП (4.5 ц/га) и препарат Фульвигрейн Классик (4.4 ц/га). Эффективность двукратной обработки посевов яровой пшеницы гуминовыми препаратами Лигногумат и Гумифул Про была несколько меньше, прибавки урожайности яровой пшеницы от их внесения составили 3.4 и 3.6 ц/га соответственно в сравнении с контролем.

Обработка посевов яровой пшеницы гуминовыми препаратами в фазе кушения и фазе начала выхода в трубку повышала количество продуктивных стеблей на 2–6 шт./м², количество зерен в колосе – на 1.0–2.2 шт., массу 1000 зерен – на 0.3–0.7 г, массу зерна – на 4–8 г/л (табл. 3).

Качество зерна яровой пшеницы в вариантах с двукратной обработкой посевов гуминовыми препаратами в фазе кушения и фазе начала выхода в трубку было выше, чем в контрольном варианте: содержание сырой клейковины увеличилось на 0.5–1.3, протеина – на 0.2–0.8, крахмала – на 1.2–1.5%. Более высокие показатели качества зерна обеспечивали внекорневые подкормки яровой пшеницы гуминовыми удобрениями ЭКО-СП, Гумат Калия Суфлер и Фульвигрейн Классик: содержание клейковины в зерне яровой пшеницы этих вариантов повышалось на 0.9–1.3, белка – на 0.6–0.8, крахмала – на 1.2–1.5% (табл. 4).

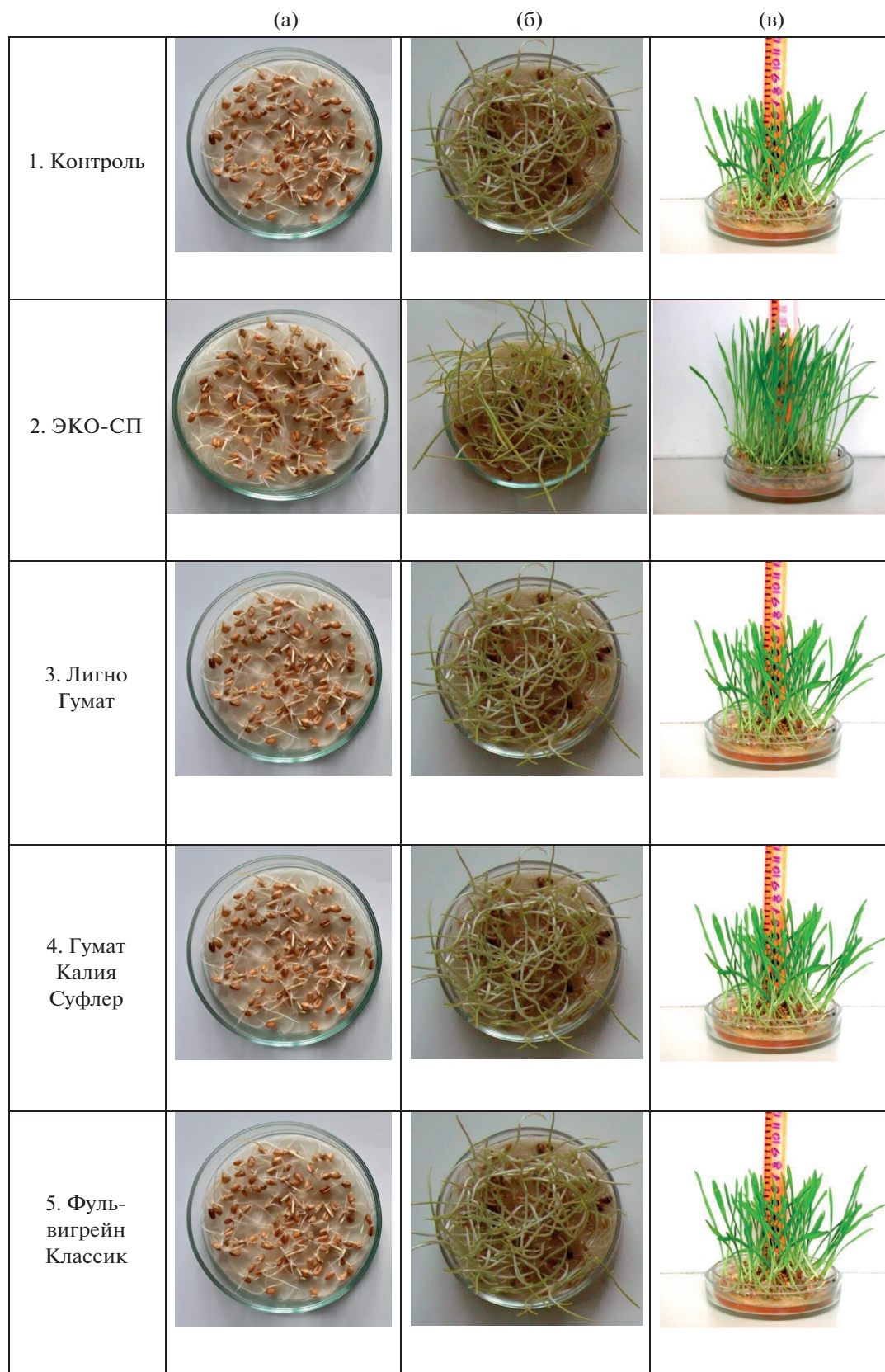


Рис. 2. Влияние гуминовых препаратов на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян яровой пшеницы (2019–2021 гг.): (а) – 3-и сут, (б) – 7-е сут, (в) – 14-е сут проращивания.

Таблица 1. Влияние гуминовых препаратов на распространенность листостебельных заболеваний яровой пшеницы (2019–2021 гг.)

Вариант	Септориоз	
	распространенность болезни	биологическая эффективность
	%	
1. Контроль без обработок препаратами	26.7	—
2. ЭКО-СП (обработка посевов в фазе кушения, 1 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1 л/га)	19.1	28.5
3. Лигногумат (обработка посевов в фазе кушения, 1.2 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1.2 л/га)	20.1	24.7
4. Гумат Калия Суфлер (обработка посевов в фазе кушения, 2.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 2.4 л/га)	18.9	29.2
5. Фульвигрейн Классик (обработка посевов в фазе кушения, 0.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.4 л/га)	19.2	28.1
6. Гумифул Про (обработка посевов в фазе кушения, 0.1 кг/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.1 кг/га)	19.8	25.8

Таблица 2. Влияние гуминовых препаратов на урожайность яровой пшеницы (2019–2021 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га	Прибавка	
		ц/га	%
1. Контроль без обработок препаратами	36.9	—	
2. ЭКО-СП (обработка посевов в фазе кушения, 1 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1 л/га)	41.4	4.5	12.2
3. Лигногумат (обработка посевов в фазе кушения, 1.2 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1.2 л/га)	40.3	3.4	9.2
4. Гумат Калия Суфлер (обработка посевов в фазе кушения, 2.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 2.4 л/га)	41.7	4.8	13.0
5. Фульвигрейн Классик (обработка посевов в фазе кушения, 0.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.4 л/га)	41.3	4.4	11.9
6. Гумифул Про (обработка посевов в фазе кушения, 0.1 кг/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.1 кг/га)	40.5	3.6	9.8
<i>HCP₀₅</i>		0.7	

Эффективность влияния гуминовых удобрений Лигногумат и Гумифул Про на качественные показатели зерна яровой пшеницы была несколько меньше: содержание клейковины в зерне повышалось на 0.4–0.5, белка — на 0.3–0.2, крахмала — на 1.0–1.1%. При сравнении эффективности влияния отдельных гуминовых препаратов между собой на показатели качества зерна яровой пшеницы достоверной разницы не наблюдали, т.е. влияние изученных гуминовых препаратов на качество зерна было практически равным.

Расчеты экономической эффективности показали, что использование гуминовых удобрений в качестве некорневых подкормок яровой пшени-

цы было экономически выгодно. Например, двукратная обработка гуминовыми удобрениями посевов в фазе кушения и фазе начала выхода в трубку повышала урожайность яровой пшеницы на 3.4–4.8 ц/га, увеличивая тем самым стоимость валовой продукции на 5100–7200 руб./га. Учитывая невысокие затраты, связанные с использованием гуминовых препаратов, а также с возможностью применения их в баковых смесях со средствами защиты растений, применение гуминовых препаратов в виде некорневых подкормок яровой пшеницы обеспечивало получение условно чистого дохода 33673–35515 руб./га, при уровне рентабельности, равном 127–134%. Наиболее вы-

Таблица 3. Влияние гуминовых препаратов на элементы структуры урожая яровой пшеницы (2019–2021 гг.)

Вариант	Количество продуктивных стеблей к уборке, шт./м ²	Число зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г	Натура зерна, г/л
1. Контроль без обработок препаратами	558	19.2	35.8	780
2. ЭКО-СП (обработка посевов в фазе кушения, 1 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1 л/га)	564	20.9	36.2	786
3. Лигногумат (обработка посевов в фазе кушения, 1.2 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1.2 л/га)	561	20.2	36.1	785
4. Гумат Калия Суфлер (обработка посевов в фазе кушения, 2.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 2.4 л/га)	563	21.4	36.5	784
5. Фульвигрейн Классик (обработка посевов в фазе кушения, 0.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.4 л/га)	563	21.2	36.3	788
6. Гумифул Про (обработка посевов в фазе кушения, 0.1 кг/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.1 кг/га)	562	20.3	36.2	784

Таблица 4. Влияние гуминовых препаратов на качество зерна яровой пшеницы (2019–2021 гг.)

Вариант	Содержание (на сухое вещество, %)		
	клейковина	протеин	крахмал
1. Контроль без обработок препаратами	24.1	11.6	60.1
2. ЭКО-СП (обработка посевов в фазе кушения, 1 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1 л/га)	25.4	12.4	61.5
3. Лигногумат (обработка посевов в фазе кушения, 1.2 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1.2 л/га)	24.6	11.9	61.1
4. Гумат Калия Суфлер (обработка посевов в фазе кушения, 2.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 2.4 л/га)	25.2	12.2	61.3
5. Фульвигрейн Классик (обработка посевов в фазе кушения, 0.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.4 л/га)	25.0	12.2	61.6
6. Гумифул Про (обработка посевов в фазе кушения, 0.1 кг/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.1 кг/га)	24.6	11.8	61.2

сокие экономические показатели обеспечивала двукратная некорневая подкормка яровой пшеницы гуминовыми удобрениями препаратами ЭКО-СП и Фульвигрейн Классик, величина условно чистого дохода от их внесения составила 35 515 и 35 101 руб./га, а уровень рентабельности – 134 и 131% соответственно (табл. 5).

Экономическая эффективность двукратной обработки посевов яровой пшеницы гуминовыми препаратами Лигногумат и Гумат Калия Суфлер была меньше, величина условно чистого дохода

от их внесения составила 33 673 и 35 101 руб./га при уровне рентабельности, равном 126 и 127% соответственно. Снижение экономической эффективности препарата Гумат Калия Суфлер было связано с более высокой дозой его внесения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные испытания гуминовых препаратов (ЭКО-СП, Лигногумат, Гумат Калия Суфлер, Фульвигрейн Классик, Гумифул Про) свидетельствовали о высокой эффек-

Таблица 5. Экономическая эффективность использования гуминовых препаратов на посевах яровых зерновых культур (2019–2021 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га	Стоимость валовой продукции, руб./га	Производственные затраты, руб./га	Себестоимость, руб./ц	Чистый доход, руб./га	Рентабельность, %
1. Контроль без обработок препаратами	36.9	55 350	25 401.79	688.37	29 949	117.9
2. ЭКО-СП (обработка посевов в фазе кушения, 1 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1 л/га)	41.4	62 100	26 585	642.15	35 515	133.5
3. Лигногумат (обработка посевов в фазе кушения, 1.2 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 1.2 л/га)	40.3	60 450	26 777	664.44	33 673	125.7
4. Гумат Калия Суфлер (обработка посевов в фазе кушения, 2.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 2.4 л/га)	41.7	62 550	27 507	659.64	35 043	127.4
5. Фульвигрейн Классик (обработка посевов в фазе кушения, 0.4 л/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.4 л/га)	41.3	61 950	26 849	650.09	35 101	130.7
6. Гумифул Про (обработка посевов в фазе кушения, 0.1 кг/га + обработка посевов в фазе выхода в трубку, 0.1 кг/га)	40.5	60 750	26 373	651.18	34 377	130.3

тивности их применения в посевах яровой пшеницы. Двукратная некорневая подкормка гуминовыми препаратами яровой пшеницы в фазе кушения и фазе начала выхода в трубку увеличивала урожайность зерна на 3.4–4.8 ц/га, повышала содержание сырой клейковины в зерне на 0.4–1.3%. При сравнении эффективности влияния отдельных препаратов между собой на урожайность и качество зерна яровой пшеницы, достоверной разницы не наблюдали, т.е. влияние изученных препаратов на урожайность и качество зерна было практически одинаковым. Эффективность использования гуминовых препаратов в качестве некорневых подкормок яровой пшеницы определялась стоимостью препаратов и дозами их внесения.

Наиболее высокие экономические показатели обеспечивала двукратная некорневая подкормка яровой пшеницы гуминовыми препаратами ЭКО-СП и Фульвигрейн Классик, величина условно чистого дохода от их внесения составила

35 515 и 35 101 руб./га, уровень рентабельности – 134 и 131% соответственно. Экономическая эффективность применения гуминовых препаратов Лигногумат и Гумат Калия Суфлер в качестве некорневых подкормок яровой пшеницы была меньше: уровень рентабельности их использования составил 126 и 127%. Снижение экономической эффективности препарата Гумат Калия Суфлер было связано с более высокой дозой его внесения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев В.Г., Беличенко М.В., Романенков В.А. Результаты мониторинга урожайности сельскохозяйственных культур, продуктивности севооборотов и изменения свойств почв в длительных опытах Географической сети // Плодородие. 2017. № 6. С. 2–7.

2. Кирюшин В.И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель // Почвоведение. 2020. № 7. С. 871–879.
3. Пыхтин И.Г., Гостев А.В., Нитченко Н.Б., Плотников В.А. Теоретические основы эффективного применения современных ресурсосберегающих технологий возделывания зерновых культур // Земледелие. 2016. № 6. С. 16–19.
4. Черкасов Г.Н., Дубовик Д.В., Масютенко Н.П. Научно-практические основы адаптивно-ландшафтной системы земледелия Курской области. Курск: ННИИЗиЗПЭ РАСХН, 2017. 188 с.
5. Соловichenko В.Д., Логвинов И.В., Ступаков А.Г. Влияние основных элементов систем земледелия на продуктивность ячменя в зернопропашном севообороте юго-западной части ЦЧЗ // Аграрн. наука. 2019. № 10. С. 59–61.
6. Чекарев П.А., Лукин С.В. Итоги реализации программы биологизации земледелия в Белгородской области // Земледелие. 2014. № 8. С. 3–6.
7. Никитин С.Н. Влияние средств химизации и биологизации на урожайность озимой пшеницы // Вестн. Ульяновск. ГСХА. 2014. № 1. С. 24–29.
8. Оказова З.П. Биопрепараты в современном земледелии // Совр. пробл науки и образ-я. 2013. № 6. С. 671.
9. Лазарев В.И., Минченко Ж.Н., Башкатов А.Я. Агро-экологическое обоснование применения комплексных удобрений с микроэлементами при возделывании яровой мягкой пшеницы в условиях черноземных почв Курской области // Теор. и прикл. экол. 2020. № 3. С. 153–159.
10. Гармаш Н.Ю., Политыко П.М., Гармаш Г.А., Новиков С.Ю., Соломатин А.В. Листовые обработки в интенсивных технологиях растениеводства // Агротех. вестн. 2020. № 5. С. 38–40.
11. Якименко О.С., Терехова В.А., Пукальчик М.А., Горленко М.В., Попов А.И. Сравнение двух интегральных биотических индексов при оценке эффективности воздействия гуминовых препаратов в модельном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 7. С. 781–792.
12. Грехова И.В. Гуминовый препарат из низинного торфа // Теор. и прикл. экол. 2015. № 1. С. 87–90.
13. Пасько С.В., Федюшкин А.В. Оптимизация минерального питания яровой пшеницы на черноземе обыкновенном // Достиж. науки и техн. АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 33–36.
14. Безуглова О.С., Полиенко Е.А., Горюцов А.В., Лыхман В.А. Применение гуминового удобрения ВЮ-DON на черноземе обыкновенном под озимую пшеницу // Теор. и прикл. экол. 2015. № 1. С. 91–97.
15. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации, М., 2021. С. 50–53.

Effectiveness of Foliar Fertilizing with Humic Preparations of Spring Wheat in the Soil and Climatic Conditions of the Kursk Region

V. I. Lazarev^{a, #}, Zh. N. Minchenko^a, A. Ya. Bashkatov^a, and N. N. Trutaeva^b

^a Kursk Federal Agrarian Scientific Center
ul. Karla Marxa 70b, Kursk 305021, Russia

^b I.I. Ivanov Kursk State Agricultural Academy
ul. Karla Marxa 70, Kursk 305021, Russia

[#]E-mail: vla190353@yandex.ru

The effectiveness of the use of humic preparations ECO-SP, Lignogumat, Potassium Humate Prompter, Fulvigrain Classic, Humiful Pro as foliar top dressing of spring wheat on chernozem typical of the Kursk region was studied. It was revealed that the treatment of spring wheat crops with humic preparations in the tillering phase and the phase of the beginning of the tube increased the yield by 3.4–4.8 kg/ha, increased the content of raw gluten in grain by 0.4–1.3%. When comparing the effectiveness of the effect of individual humic preparations among themselves on the yield and quality of spring wheat grain, no significant difference was observed, i.e. the effect of the studied preparations on the yield and quality of grain was almost the same. The effectiveness of using various types of humic preparations as non-root top dressing of spring wheat was determined by the cost of the preparations themselves and the doses of their application. The highest economic indicators were provided by two-fold non-root fertilizing of spring wheat with ECO-SP and Fulvigrain Class preparations, the value of the conditional net income from their application was 35515 and 35101 rubles/ha, the level of profitability was 134 and 131%, respectively. The economic efficiency of using humic preparations Lignohumate and Potassium Humate Prompter as non-root top dressing of spring wheat was less: the profitability of their use was 126 and 127%. A decrease in the economic effectiveness of the Potassium Humate Prompter preparation was associated with a higher dose of its application.

Key words: spring wheat, humic preparations, ECO-SP, Lignohumate, Potassium Humate Prompter, Fulvigrain Classic, Humiful Pro, yield, crop structure, gluten content, septoria, economic efficiency, Kursk region.

РАЗДЕЛЬНОЕ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ СТРЕСС-ФАКТОРОВ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ПШЕНИЦЫ¹

© 2022 г. Е. С. Холопцева^{1,*}, Ю. В. Венжик²

¹ Институт биологии — обособленное подразделение ФИЦ “Карельский научный центр РАН”
185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия

² Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН
127276 Москва, ул. Ботаническая, 35, Россия

*E-mail: holoptseva@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 04.04.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Постоянно меняющиеся условия природной среды, климатические флуктуации и возрастающая антропогенная нагрузка на экосистемы заставляют исследователей применять все более разнообразные подходы для понимания адаптивных возможностей растительных организмов. Одним из таких подходов является сравнительный анализ реакции растений на раздельное и последовательное воздействие стресс-факторов разной природы. В данном исследовании в регулируемых условиях среды изучены изменения в фотосинтетическом аппарате (ФСА) проростков пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при раздельном и последовательном действии низкой температуры (4°C) и сульфата кадмия (100 мкМ). Установлено, что воздействие только низкой температуры (7 сут) вызывало снижение интенсивности нетто-фотосинтеза, максимального квантового выхода фотосистемы II (F_v/F_m) и устьичной проводимости, но содержание хлорофиллов в листьях пшеницы увеличивалось. При этом существенно возрастала холодоустойчивость растений, а следовательно, происходила адаптация ФСА к функционированию в условиях низких температур. Последовательное действие кадмия (24 ч) и низкой температуры (7 сут) еще больше снижало интенсивность фотосинтеза и устьичную проводимость, в то время как показатели F_v/F_m и содержание хлорофиллов в листьях пшеницы изменялись в меньшей степени. Кроме того, наблюдали прирост холодоустойчивости растений, который хоть и был небольшим, однако достоверно превышал исходный уровень. Следовательно, предобработка кадмием приводила к некоторому “сбою” программы холодовой адаптации, запускаемой низкой температурой. Воздействие только кадмия (7 сут) снижало интенсивность нетто-фотосинтеза, содержание хлорофиллов в листьях и их устьичную проводимость, но не влияло на показатель F_v/F_m . При этом холодоустойчивость растений также возрастала, видимо, как следствие “включения” механизмов кросс-адаптации. Последовательное действие низкой температуры (24 ч) и кадмия (7 сут) усиливало негативное влияние тяжелого металла на ФСА пшеницы, значительно снижая интенсивность фотосинтеза, устьичную проводимость листьев, а также содержание в них хлорофиллов. Кроме того, холодоустойчивость растений увеличивалась лишь при предобработке холодом, а в дальнейшем под действием кадмия уменьшалась до исходного уровня. Показано, что характер ответной реакции растений на действие стресс-факторов зависел не только от их природы, но и определялся типом предобработки при последовательном их применении.

Ключевые слова: низкая температура, кадмий, последовательное действие, холодоустойчивость, фотосинтетический аппарат, устьичная проводимость, *Triticum aestivum* L.

DOI: 10.31857/S0002188122080087

ВВЕДЕНИЕ

На растения в процессе их жизненного цикла действуют факторы внешней среды, сочетание которых может быть различным. Северные реги-

оны нашей страны отличаются своими особенностями, а именно, неблагоприятными температурными условиями, с одной стороны, и возможным загрязнением почв кадмием вблизи промышленных городов, с другой стороны. Кадмий является одним из наиболее токсичных тяжелых металлов (ТМ), который изменяет процессы фотосинтеза,

¹ Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (темы № FMEN-2022-0004 и 121040800153-1).

дыхания, нарушает водный обмен и минеральное питание, замедляя рост и развитие растений [1–8]. Существенное воздействие на растительный организм оказывает и низкая температура. Многие холодоустойчивые растения, в том числе озимые злаки, хорошо приспособлены к ней. В условиях холода такие растения реализуют комплекс адаптивных реакций, затрагивающих фотосинтетический аппарат (ФСА), высоко чувствительный к любым изменениям внешней среды [9–15]. Под влиянием низкой температуры отмечено адаптивное торможение роста и снижение фотосинтеза, происходит ряд ультраструктурных перестроек в клетках листьев, изменяется соотношение фотосинтетических пигментов и др. [16–19]. В то же время большая часть приспособительных механизмов, которые растения используют для поддержания своей жизнеспособности, являются общими, т.е. неспецифическими [9, 20, 21]. Универсальность этих механизмов особенно актуальна в случае комбинированного сочетания факторов разной природы, например, физического (температуры) и химического (загрязнения кадмием), что может создавать дополнительные трудности для растений, усиливая стрессовую нагрузку. При этом ответная реакция растений может сильно отличаться от таковой при раздельном действии стресс-факторов [17, 18, 22–28]. Очевидно, что каждый из них по отдельности будет оказывать влияние на основные физиологические процессы в растительном организме, однако реакция растений на последовательное действие стресс-факторов разной природы исследована лишь фрагментарно [23, 29]. Особую важность, на наш взгляд, представляют экспериментальные исследования, проводимые в регулируемых условиях, что позволяет сравнивать реакцию растений на различные типы стрессовых обработок, в том числе в субповреждающих дозах, применение которых дает возможность судить о проявлении адаптивного потенциала растений в разных условиях. Учитывая выше сказанное, цель работы – сравнительный анализ раздельного и последовательного действия стресс-факторов разной природы (низкой температуры и кадмия в субповреждающих концентрациях) на ФСА проростков озимой пшеницы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыты проводили с проростками озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Московская 39, выращенными в рулонах фильтровальной бумаги на питательном растворе Кнопа при pH раствора 6.2 [30] в камере искусственного климата

при температуре воздуха 22°C, его относительной влажности 60–70%, освещенности 15 кЛк и фотопериоде 14 ч. По достижению недельного возраста проростки в течение 7 сут подвергали раздельному и последовательному воздействию низкой закалывающей температуры (4°C) и сульфата кадмия в субповреждающей концентрации (100 мкМ) по представленной схеме, варианты:

1. 4°C – действие низкой температуры: недельные проростки пшеницы закаляли при 4°C в течение 7 сут при прочих постоянных условиях;

2. Cd → 4°C – последовательное действие кадмия и низкой температуры: недельные проростки помещали на раствор Кнопа с добавлением соли сульфата кадмия в концентрации 100 мкМ и выдерживали 24 ч при 22°C, а затем растения переносили на раствор Кнопа без кадмия и закаляли при 4°C в течение 7 сут;

3. Cd – действие кадмия: недельные проростки переносили на раствор Кнопа с добавлением соли сульфата кадмия в концентрации 100 мкМ и выдерживали в течение 7 сут при 22°C;

4. 4°C → Cd – последовательное действие низкой температуры и кадмия: недельные проростки закаляли 24 ч при 4°C, а затем перемещали на раствор Кнопа с добавлением соли сульфата кадмия в концентрации 100 мкМ и выдерживали 7 сут при 22°C.

Выбор температуры, концентрации соли металла и экспозиции воздействий основан на предыдущих исследованиях [25–27, 29].

О холодоустойчивости проростков судили по температуре (LT_{50} , °C), вызывающей гибель 50% палисадных клеток паренхимы листовых высечек после их 5-минутного промораживания в термоэлектрическом микрохолодильнике “ТЖР-02/-20” (Интерм, Россия) при последовательном снижении температуры с интервалом 0.4°C [31]. Жизнеспособность клеток после промораживания определяли с помощью светового микроскопа “Микмед-2” (ЛОМО, Россия) по деструкции хлоропластов и коагуляции цитоплазмы.

Показатели CO_2 -обмена анализировали с помощью установки для исследования CO_2 -газообмена и водяных паров HCM-1000 (“Walz”, Германия). В ходе экспериментов измеряли интенсивность нетто-фотосинтеза и устьичную проводимость с пересчетом на CO_2 . Измерения проводили в климатической камере при температурах, соответствующих вариантам опыта (22 или 4°C).

Флуоресценцию хлорофилла *a* измеряли с помощью флуориметра MINI-PAM (“Walz”, Германия) на листьях, предварительно адаптированных

Таблица 1. Динамика холодоустойчивости пшеницы под влиянием низкой температуры (4°C), кадмия (100 мкМ) и при последовательном действии факторов

Экспозиция, ч	Тип стрессового воздействия			
	4°C	Cd → 4°C	Cd	4°C → Cd
0	-5.2 ± 0.1^k	$-5.7 \pm 0.1^{1*}$	-5.3 ± 0.1^k	$-6.0 \pm 0.1^{1*}$
1	$-5.9 \pm 0.1^*$	$-6.1 \pm 0.1^*$	$-5.8 \pm 0.1^*$	$-6.1 \pm 0.1^*$
5	$-6.0 \pm 0.1^*$	$-7.0 \pm 0.1^*$	$-6.1 \pm 0.1^*$	$-6.0 \pm 0.1^*$
24	$-6.5 \pm 0.1^*$	$-7.0 \pm 0.1^*$	$-6.3 \pm 0.1^*$	$-6.0 \pm 0.1^*$
48	$-6.7 \pm 0.1^*$	$-6.9 \pm 0.1^*$	$-6.7 \pm 0.1^*$	$-5.9 \pm 0.1^*$
72	$-7.1 \pm 0.1^*$	$-6.8 \pm 0.1^*$	$-6.7 \pm 0.1^*$	$-5.9 \pm 0.1^*$
96	$-7.4 \pm 0.1^*$	$-6.4 \pm 0.1^*$	$-6.3 \pm 0.1^*$	$-5.6 \pm 0.1^*$
144	$-7.7 \pm 0.1^*$	$-6.2 \pm 0.1^*$	$-6.2 \pm 0.1^*$	$-5.5 \pm 0.1^*$
168	$-8.1 \pm 0.1^*$	$-5.8 \pm 0.1^*$	$-6.1 \pm 0.1^*$	-5.4 ± 0.1

Примечание. ^k – исходный уровень, ¹ – экспозиция растений на растворе кадмия или при 4°C в течение 24 ч, * – статистически значимые отличия от исходного уровня. То же в табл. 3, 4.

к темноте в течение 15 мин. Максимальный квантовый выход фотосистемы II (F_v/F_m) рассчитывали по общеизвестным формулам [32].

Суммарное содержание хлорофиллов $a + b$ в листьях измеряли с помощью спектрофотометра СФ-2000 (“Спектр”, Россия) в спиртовой вытяжке [33].

Биологическая повторность в пределах каждого варианта опыта составляла для разных показателей от 3 до 6. Каждый опыт повторяли не менее 3 раз. При обработке результатов исследования использовали программу Microsoft Excell 2007. В таблицах и на рисунках представлены средние арифметические и их стандартные ошибки. В статье обсуждаются величины, достоверно различавшиеся при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Действие низкой температуры 4°C. Воздействие низкой закалывающей температуры 4°C (7 сут) приводило к стойкому приросту холодоустойчивости пшеницы, которая начинала возрастать уже в первые часы опыта (табл. 1). В дальнейшем она продолжала расти и на 7-е сут закалывания более чем на 50% превышала исходный уровень (табл. 2). Этот процесс сопровождался рядом изменений в ФСА пшеницы. Например, уже в первые часы холодового воздействия происходило резкое ингибирование фотосинтеза, который немного стабилизировался к концу эксперимента (рис. 1а). Кроме того, максимальный квантовый выход фотосистемы II (F_v/F_m) несколько уменьшался под влиянием холода (табл. 3), оставаясь на 7-е сут опыта на уровне $\approx 90\%$ от исходного (табл. 2). Отметим также, что суммарное

содержание хлорофиллов в листьях пшеницы продолжало увеличиваться на протяжении практически всего периода низкотемпературного закалывания (табл. 4). Вместе с тем, устьичная проводимость листьев снижалась уже в первые часы действия низкой температуры, немного стабилизируясь на заключительном этапе охлаждения (6–7-е сут) (рис. 1б).

Последовательное действие кадмия и низкой температуры Cd → 4°C. Предобработка растений сульфатом кадмия (100 мкМ; 24 ч) вызывала достоверный прирост холодоустойчивости клеток листьев (табл. 1). В дальнейшем при переносе растений в условия охлаждения при 4°C (7 сут) она продолжала нарастать в течение первых суток, но к концу опыта снижалась, хотя и превышала исходный уровень (табл. 1). В то же время

Таблица 2. Количественная оценка изменения некоторых физиологических показателей проростков пшеницы в зависимости от стрессового воздействия. % от контроля

Показатель	Тип стрессового воздействия			
	4°C	Cd + 4°C	Cd	4°C + Cd
Холодоустойчивость	156	112	115	102
Фотосинтез	45	35	82	60
Максимальный квантовый выход ФС II, F_v/F_m	88	91	103	91
Содержание хлорофиллов $a + b$	108	95	91	87
Устьичная проводимость	50	40	84	56

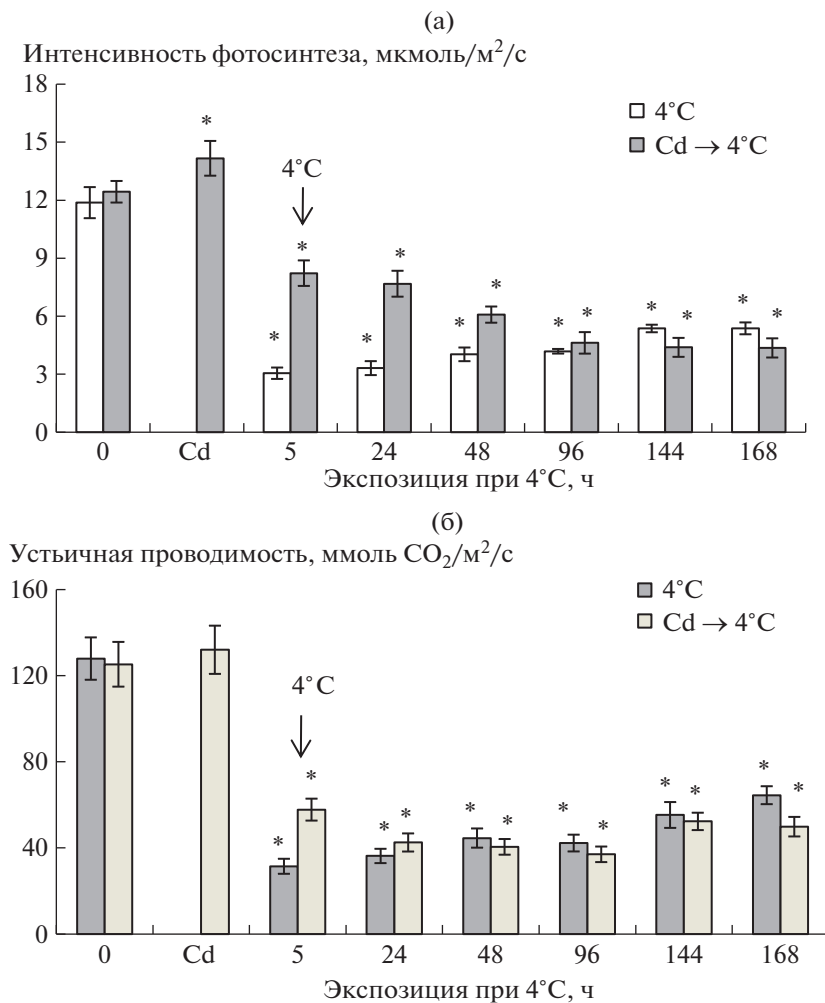


Рис. 1. Интенсивность нетто-фотосинтеза (а) и устьичная проводимость (б) листьев проростков пшеницы под влиянием низкой температуры (4°C) и при последовательном действии кадмия и низкой температуры (Cd → 4°C).

предобработка кадмием несколько увеличивала фотосинтетическую активность растений, а также “смягчала” ингибирующее действие холода на этот показатель в первые 2-е сут низкотемпературного воздействия (рис. 1а). Последовательное

действие кадмия и холода вызывало снижение показателя F_v/F_m (табл. 3), но лишь на 9% (табл. 2), а также стимулировало некоторое повышение суммарного содержания хлорофиллов в листьях пшеницы в течение первых суток опыта (табл. 4).

Таблица 3. Динамика максимального квантового выхода ФС II (F_v/F_m) в листьях пшеницы под влиянием низкой температуры (4°C), кадмия (100 мкМ) и при последовательном действии факторов

Экспозиция, ч	Тип стрессового воздействия			
	4°C	Cd → 4°C	Cd	4°C → Cd
0	0.74 ± 0.01^k	0.72 ± 0.01^l	0.74 ± 0.01^k	$0.68 \pm 0.01^{l*}$
5	0.73 ± 0.01	0.70 ± 0.01	0.75 ± 0.01	0.70 ± 0.01
24	$0.69 \pm 0.02^*$	$0.64 \pm 0.02^*$	$0.77 \pm 0.01^*$	0.72 ± 0.01
48	$0.70 \pm 0.02^*$	$0.60 \pm 0.01^*$	0.76 ± 0.01	0.73 ± 0.01
72	$0.63 \pm 0.02^*$	$0.60 \pm 0.01^*$	$0.77 \pm 0.01^*$	0.73 ± 0.01
96	$0.62 \pm 0.02^*$	$0.59 \pm 0.01^*$	0.76 ± 0.01	0.74 ± 0.01
168	$0.65 \pm 0.01^*$	$0.67 \pm 0.01^*$	0.76 ± 0.01	$0.67 \pm 0.02^*$

Таблица 4. Динамика содержания хлорофиллов $a + b$ (мг/г сырой массы) в листьях пшеницы под влиянием низкой температуры (4°C), кадмия (100 мкМ) и при последовательном действии факторов

Экспозиция, ч	Тип стрессового воздействия			
	4°C	Cd → 4°C	Cd	4°C → Cd
0	1.96 ± 0.02^k	2.04 ± 0.02^l	1.96 ± 0.02^k	2.02 ± 0.01^l
5	1.98 ± 0.04	$2.12 \pm 0.01^*$	1.99 ± 0.02	2.05 ± 0.02
24	$2.12 \pm 0.04^*$	$2.12 \pm 0.01^*$	$2.11 \pm 0.01^*$	$2.11 \pm 0.01^*$
48	$2.06 \pm 0.01^*$	$1.91 \pm 0.01^*$	$2.12 \pm 0.01^*$	$2.12 \pm 0.01^*$
72	$2.12 \pm 0.02^*$	1.99 ± 0.01	$2.06 \pm 0.02^*$	1.93 ± 0.02
96	$2.19 \pm 0.05^*$	$1.89 \pm 0.01^*$	1.97 ± 0.01	1.72 ± 0.01
168	$2.12 \pm 0.04^*$	$1.86 \pm 0.04^*$	$1.79 \pm 0.04^*$	$1.71 \pm 0.01^*$

Однако на 2–4-е сут эксперимента этот показатель снижался до исходного уровня, а на 6–7-е сут — был меньше исходных показателей (табл. 2). Отметим также, что предобработка растений пшеницы кадмием не вызывала изменений устьичной проводимости листьев, тем не менее, в условиях действия низкой температуры этот показатель резко уменьшался, оставаясь на уровне меньше исходного до конца опыта (рис. 16).

Действие кадмия. Важно, что уже в первые часы действия кадмия (100 мкМ, 7 сут) происходил рост холодоустойчивости клеток листьев пшеницы, который продолжался в течение последующих 3-х сут и сохранялся к концу эксперимента на уровне выше исходного (табл. 1). При этом интенсивность нетто-фотосинтеза под влиянием кадмия снижалась, составляя $\approx 80\%$ от исходного уровня на 6–7-е сут эксперимента (табл. 2; рис. 2а). Отметим также, что кадмий не оказывал существенного влияния на показатель F_v/F_m (табл. 3), но приводил к заметному снижению содержания хлорофиллов в листьях и устьичной проводимости листьев пшеницы (табл. 4; рис. 2б).

Последовательное действие низкой температуры и кадмия 4°C → Cd. Воздействие низкой закалывающей температуры 4°C (24 ч) на проростки пшеницы вызывало увеличение холодоустойчивости клеток листьев, которая в дальнейшем под влиянием кадмия (100 мкМ; 7 сут) постепенно снижалась до исходного уровня (табл. 1). Кроме того, предобработка холодом приводила к уменьшению интенсивности фотосинтеза листьев пшеницы, а при снятии температурного фактора этот показатель быстро (через 5 ч) восстанавливался до исходного, постепенно снижаясь на 4–7-е сут опыта (рис. 2а). Предобработка низкой температурой примерно на 10% снижала показатель F_v/F_m , и под влиянием кадмия он к концу эксперимента оставался на том же уровне (табл. 2, 3).

Более того, низкая температура достоверно не изменяла содержание хлорофиллов в листьях пшеницы, но в условиях действия кадмия количество пигментов заметно уменьшалось (табл. 2, 4). Под влиянием холода снижалась и устьичная проводимость листьев пшеницы, однако после снятия температурного фактора проводимость устьиц несколько восстанавливалась, хотя к концу эксперимента оставалась на 44% меньше исходных показателей (рис. 2б, табл. 2).

Сравнительный анализ действия низкой температуры 4°C и последовательного действия Cd → 4°C. Адаптивный ответ озимых злаков на действие низких температур достаточно неплохо изучен [17, 18, 34]. Отдельный интерес представляет сравнительный анализ реакции пшеницы на действие только низкотемпературного фактора и последовательного влияния двух факторов разной природы (кадмия и температуры). В нашем исследовании установлено, что в обоих случаях происходило увеличение холодоустойчивости растений, сопровождавшееся рядом изменений в ФСА, динамика и характер которых определялись типом стрессовой обработки.

Под влиянием только низкой температуры увеличение холодоустойчивости пшеницы началось уже в первые часы и продолжалось на протяжении всего периода закалывания (табл. 1). Одновременно наблюдали резкое ингибирование фотосинтеза и устьичной проводимости листьев (рис. 1). Отмеченные изменения являлись необходимым условием адаптации холодоустойчивых растений и могли быть связаны с частичным закрытием устьиц и затруднением транспирации, что обеспечивало сохранение оводненности тканей растений в условиях холодового стресса [10, 12, 14, 35, 36]. Стабилизация фотосинтеза и устьичной проводимости на низком, но постоянном уровне к концу закалывания, скорее всего, была обусловлена комплексом адаптивных фи-

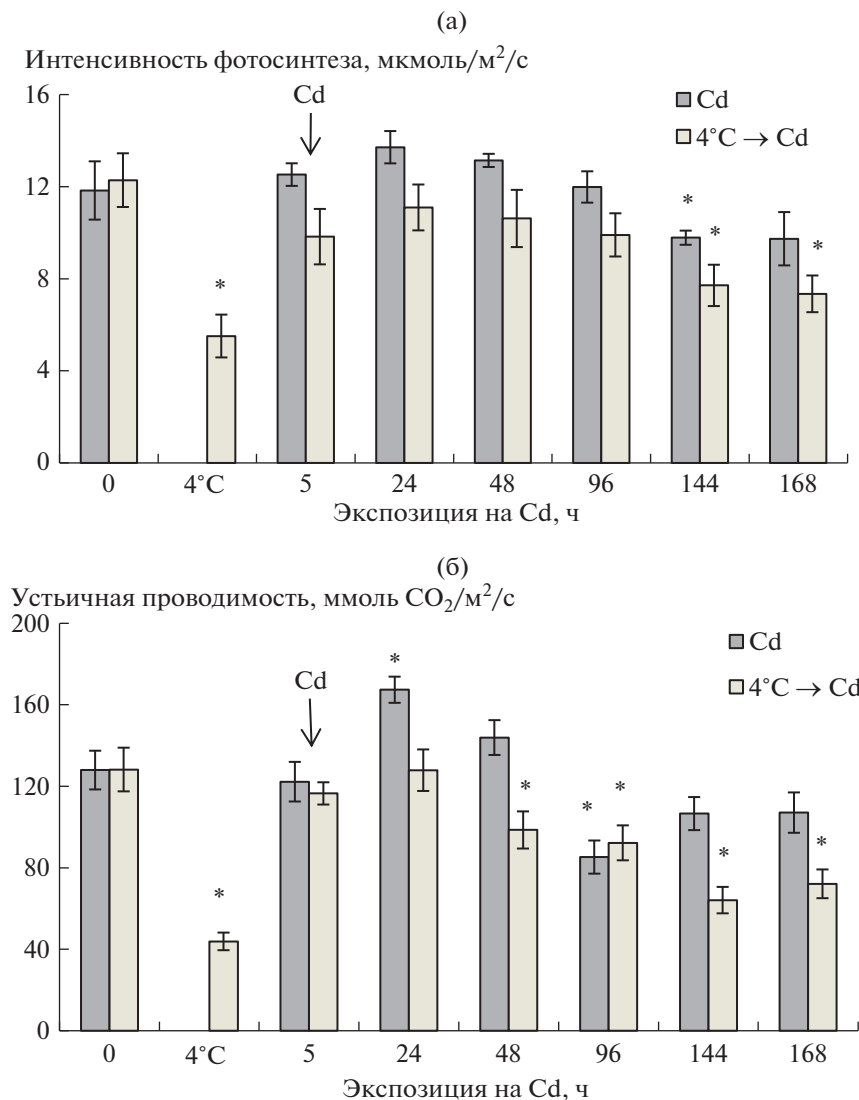


Рис. 2. Интенсивность нетто-фотосинтеза (а) и устьичная проводимость (б) листьев проростков пшеницы под действием кадмия (100 μM) и при последовательном действии низкой температуры и кадмия (4°C → Cd).

зиолого-биохимических реакций и структурно-функциональных изменений ФСА, которые возникают в клетках и тканях холодостойких растений под действием низкой температуры. Эти изменения включают перераспределение фотосинтетических пигментов, укрупнение клеток мезофилла, увеличение числа хлоропластов в них, формирование хлоропластов “светового” типа и др. [10, 12–15, 17–19]. Кроме того, в наших опытах показано, что под влиянием холода показатель F_v/F_m снижался лишь на 10% (табл. 2), а содержание хлорофиллов в листьях пшеницы продолжало увеличиваться (табл. 4), т.е. синтез зеленых пигментов не прекращался. Этот факт свидетельствовал о стабильности фотосинтетических мембран, которые у озимых злаков претерпевают ряд изменений под влиянием холода: су-

щественно меняется их биохимический состав и соотношение белки/липиды, насыщенные/ненасыщенные жирные кислоты [37–39].

Суточная предобработка проростков пшеницы сульфатом кадмия, предшествующая длительному (7 сут) холодовому закаливанию, изменяла ответную реакцию растений на действие температуры. Кадмий вызывал некоторое повышение холодоустойчивости пшеницы, а дальнейшее действие холода стимулировало ее дополнительный рост (табл. 1). Эти данные хорошо коррелируются с представлениями о существовании общих (неспецифических) адаптивных реакций, играющих значительную роль в процессе формирования повышенной устойчивости к стрессу [9, 20, 21]. В то же время сравнительный анализ результатов исследования показал, что

прирост устойчивости при последовательном действии кадмия и низкой температуры уступал максимальному эффекту, достигаемому в процессе низкотемпературного закаливания без предобработки (табл. 2). Тем не менее, наблюдаемый прирост холодоустойчивости превышал 10% от исходного уровня и сопровождался рядом изменений в активности ФСА. Предобработка кадмием несколько увеличивала фотосинтетическую активность растений (рис. 1а) и в первые 2-е сут холодого воздействия “смягчали” ее ингибирующее действие. Возможно, такое “смягчение” могло быть связано с известным из литературных данных явлением, когда совместное действие одного из факторов способно “нивелировать” действие другого. Например, было установлено, что засоление может увеличивать устойчивость фотосистем к тепловому шоку [40] и охлаждению [41], а совместное действие низкой температуры и кадмия вызывает меньшее увеличение проницаемости мембран, чем их раздельное действие [42].

Последовательное действие кадмия и низкой температуры приводило к торможению синтеза хлорофиллов, содержание которых в листьях пшеницы снижалось при этом типе стрессовой обработки (табл. 4). Очевидно, что в данном случае именно кадмий оказывал негативное влияние на пул фотосинтетических пигментов, поскольку известно, что он может как нарушать их синтез, так и вызывать деградацию [43–45].

Еще раз подчеркнем, что суточное воздействие кадмия перед последующим низкотемпературным закаливанием не вызывало видимых изменений устьичной проводимости CO_2 -обмена и приводило к некоторому увеличению фотосинтеза (рис. 1). Эти факты свидетельствовали о достаточном поступлении CO_2 в межклетники [27] и способности растений сохранять фотосинтетическую активность. Очевидно, что концентрация металла в пределах суточной экспозиции являлась достаточно низкой (субповреждающей), а способность злаковых задерживать большую часть металла в корневой системе [4], в свою очередь, нивелировала повреждающие эффекты кадмия на фотосинтез и устьичную проводимость.

Исходя из проведенного анализа данных, можно заключить, что при последовательном действии кадмия и температуры, ФСА растений подвергалось повышенной нагрузке, и это, с одной стороны, приводило к частичному “сбою” программы холодовой адаптации, запускаемой низкой температурой, а с другой, способствовало возникновению кросс-адаптивных перестроек,

обеспечивающих поддержание холодоустойчивости растений на повышенном уровне.

Сравнительный анализ действия кадмия и последовательного действия $4^\circ\text{C} \rightarrow \text{Cd}$. Кадмий, как один из высокотоксичных металлов, вызывает многочисленные негативные эффекты в ФСА растений [3–8]. Одной из наших задач было сравнение реакции растений только на действие кадмия и последовательное действие холода и ТМ.

Установлено, что увеличение холодоустойчивости пшеницы происходило как под влиянием только кадмия, так и при последовательном действии двух стрессоров (табл. 1). В первом случае это еще раз доказывало существование механизмов кросс-адаптации растений, а во втором, очевидно, было обусловлено действием суточной предобработки холодом. Кроме того, при раздельном и последовательном действии изученных стрессоров в ФСА пшеницы обнаружен ряд изменений, отличающихся своим характером.

Например, под влиянием только кадмия наблюдали снижение фотосинтеза и устьичной проводимости, уменьшение содержания хлорофиллов в листьях пшеницы (табл. 2, 4, рис. 2). Эти результаты коррелируют с известными данными, согласно которым снижение интенсивности фотосинтеза в присутствии кадмия является основным проявлением его токсического действия [2, 5, 8]. Уменьшение содержания хлорофиллов в листьях могло быть обусловлено, с одной стороны, прямым влиянием кадмия на их биосинтез и/или деградацию [45], с другой стороны, изменениями в ультраструктуре и биохимическом составе фотосинтетических мембран под действием ТМ [43, 44]. Исходя из наших и литературных данных, можно сделать вывод, что негативное действие кадмия на ФСА в большей степени определялось его влиянием именно на пул фотосинтетических пигментов. Известно также, что под влиянием кадмия прекращается рост клеток мезофилла и уменьшается число хлоропластов [25]. Следовательно, наблюдаемые нами изменения в ФСА пшеницы не носили адаптивный характер, как это было в случае действия низкой температуры, а являлись следствием негативного влияния тяжелого металла на ФСА.

Анализ результатов показал, что последовательное действие холода и кадмия еще в большей степени снижали фотосинтез, устьичную проводимость и содержание хлорофиллов в листьях пшеницы, а также приводили к снижению показателя F_v/F_m (табл. 2, 3, 4, рис. 2). Уменьшение последнего показателя, по всей видимости, определялось именно действием температуры, поскольку

ку величина F_v/F_m характеризует активность работы фотосистемы II, высоко чувствительной к холоду [17–19, 32]. К тому же из полученных нами данных следовало, что этот показатель под влиянием только кадмия не изменялся (табл. 3). Отметим также, что снижение фотосинтеза, устьичной проводимости и содержания хлорофиллов в случае последовательного действия холода и кадмия было ощутимо большим, чем при их раздельном действии на растения. В данном случае отметили типичную закономерность “наложения” эффектов двух стрессовых факторов, когда один из них (низкая температура) только усиливал действие другого (кадмий).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что ответная реакция фотосинтетического аппарата (ФСА) растений пшеницы на действие низкой температуры, кадмия, и их последовательное применение отличалась своими особенностями в зависимости от типа стрессовой обработки. Воздействие только низкой температуры вызывало адаптивное снижение интенсивности нетто-фотосинтеза, показателя F_v/F_m и устьичной проводимости, но стимулировало увеличение содержания хлорофиллов в листьях. Предобработка кадмием вызывала еще большее снижение фотосинтеза и устьичной проводимости, а также тормозила синтез хлорофиллов в листьях. Следовательно, предобработка кадмием несколько “сбивала” программу холодовой адаптации растений, однако холодоустойчивость пшеницы оставалась на повышенном уровне, что, скорее всего, было связано с частичной реализацией адаптивных изменений в ФСА под действием холода, а также с кросс-адаптивными перестройками в нем. С другой стороны, длительное воздействие кадмия негативно влияло на интенсивность нетто-фотосинтеза, содержание хлорофиллов и устьичную проводимость листьев пшеницы, не изменяя показатель активности фотосистемы II – F_v/F_m . Предобработка холодом усиливала негативное влияние кадмия на ФСА пшеницы, вызывая большее снижение фотосинтеза, F_v/F_m , устьичной проводимости и содержания хлорофиллов в листьях. Более того, она не способствовала росту холодоустойчивости растений, а слабый прирост устойчивости, обнаруженный в первые сутки опыта, был стимулирован, вероятно, именно воздействием температуры 4°C. Таким образом, реакция растений на действие разных стрессоров зависела не только от природы действующих факторов, но и от последовательности их воздействия.

Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 172 с.
2. Hasan S.A., Fariduddin Q., Ali B., Hayat B.A., Ahmad A. Cadmium: toxicity and tolerance in plants // J. Environ. Biol. 2009. V. 30. P. 165–174.
3. Gallego S.M., Pena L.B., Barcia R.A., Azpilicueta C.E., Iannone M.F., Rosales E.P., Zawoznik M.S., Groppa M.P., Benavides M.P. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms // Environ. Exp. Bot. 2012. V. 83. P. 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.006>
4. Казнина Н.М., Тимов А.Ф. Влияние кадмия на физиологические процессы и продуктивность растений семейства Poaceae // Усп. совр. биол. 2013. Т. 133. С. 588–603.
5. Hoseini S.M., Zargari F. Cadmium in plants: a review // Inter. J. Fisher. Aqua. Studies. 2013. V. 2. P. 579–581.
6. Tran T.A., Popova L.P. Function and toxicity of cadmium in plants: recent advances and future prospects // Turk. J. Bot. 2013. V. 37. P. 1–13.
7. Мурзабаев А.Р., Безрукова М.В., Шакирова Ф.М. Защитные механизмы растений в ответ на токсическое действие ионов кадмия // Агрохимия. 2014. № 10. С. 83–93.
8. Тимов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 194 с.
9. Тимов А.Ф., Акимова Т.В., Таланова В.В., Топчиева Л.В. Устойчивость растений в начальный период действия неблагоприятных температур. М.: Наука, 2006. 143 с.
10. Трунова Т.И. Растение и низкотемпературный стресс // Тимирязевские чтения. Т. 64. М.: Наука, 2007. 54 с.
11. Ruelland E., Zachowski A. How plants sense temperature // Environ. Exp. Bot. 2010. V. 69. P. 225–232. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.011>
12. Theocharis A., Clement Ch., Barka E.A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperature // Planta. 2012. V. 235. P. 1091–1105. <https://doi.org/10.1007/s00425-012-164/-y>
13. Riban H.Z., Al-Issawi M., Fuller M.P. Advances in physiological and molecular aspects of plant cold tolerance // J. Plant Interact. 2017. V. 12. P. 143–157. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1308568>
14. Ding Ya., Shi Yi., Yang Sh. Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants // New Phytologist. 2019. V. 222. P. 1690–1704. <https://doi.org/10.1111/nph.15696>
15. Ritonga F.N., Chen S. Physiological and molecular mechanism Involved in cold stress tolerance in plants // Rev. Plants. 2020. V. 9. P. 560. <https://doi.org/10.3390/plants9050560>

16. Мирославов Е.А. Структурная адаптация растений к холодному климату // Бот. журн. 1994. Т. 79. С. 20–26.
17. Венжик Ю.В., Титов А.Ф., Таланова В.В., Фролова С.А., Таланов А.В., Назаркина Е.А. Влияние пониженной температуры на устойчивость и функциональную активность фотосинтетического аппарата пшеницы // Изв. РАН. Сер. биол. 2011. № 2. С. 171–177.
18. Венжик Ю.В., Титов А.Ф., Таланова В.В., Мирославов Е.А., Котеева Н.К. Структурно-функциональная реорганизация фотосинтетического аппарата растений пшеницы при холодовой адаптации // Цитология. 2012. Т. 54. С. 916–924.
19. Venzhik Yu.V., Shchyogolev S.Yu., Dykman L.A. Ultrastructural reorganization of chloroplasts during plant adaptation to abiotic stress factors // Rus. J. Plant Physiol. 2019. V. 66. P. 850. <https://doi.org/10.1134/S102144371906013X>
20. Чиркова Т.В. Физиологические основы устойчивости растений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 244 с.
21. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. Учебник. М.: Изд-во Абрис, 2011. Т. 1. 783 с.
22. Гармаш Е.В., Головкин Т.К. Влияние кадмия на рост и дыхание ячменя при двух температурных режимах выращивания // Физиология растений. 2009. Т. 56. С. 382–387.
23. Zhao F.-Y., Liu W., Zhang S.-Y. Different responses on plant growth and antioxidant system to the combination of cadmium and heat stress in transgenic and non-transgenic rice // J. Integrat. Plant Biol. 2009. V. 51. P. 942–950. <https://doi.org/10.1111/J1744-7909.2009.00865>
24. Репкина Н.С., Таланова В.В., Титов А.Ф., Букарева И.В. Реакция растений пшеницы (*Triticum aestivum* L.) на раздельное и совместное действие низкой температуры и кадмия // Тр. КарелНЦ РАН. 2014. № 5. С. 133–139. <https://doi.org/10.17076/eb229>
25. Венжик Ю.В., Таланова В.В., Титов А.Ф., Холопцева Е.С. О сходстве и различиях в реакции растений пшеницы на действие низкой температуры и кадмия // Изв. РАН. 2015. № 6. С. 597–604. <https://doi.org/10.7868/S000232915060120>
26. Венжик Ю.В., Титов А.Ф., Холопцева Е.С., Таланова В.В. Раздельное и совместное действие низкой температуры и кадмия на некоторые физиологические показатели пшеницы // Тр. КарелНЦ РАН. 2015. № 12. С. 23–34. <https://doi.org/10.17076/eb248>
27. Холопцева Е.С., Таланова В.В. Влияние низкой температуры и кадмия на интенсивность фотодыхания проростков пшеницы // Тр. КарелНЦ РАН. 2018. № 6. С. 22–29. <https://doi.org/10.17076/e704>
28. Губанова Т.Б., Палий А.Е. Физиолого-биохимические аспекты морозостойкости *Olea europaea* L. // Физиология растений. 2020. Т. 67. С. 428–437. <https://doi.org/10.31857/S0015330320030100>
29. Венжик Ю.В., Титов А.Ф., Таланова В.В. Реакция растений пшеницы на комбинированное действие низкой температуры и кадмия // Тр. КарелНЦ РАН. 2017. № 12. С. 108–117. <https://doi.org/10.17076/eb662>
30. Гродзинский А.М., Гродзинский Д.М. Справочник по физиологии растений Киев: Наукова думка, 1973. С. 29–30.
31. Балагурова Н.И., Дроздов С.Н., Хилков Н.И. Метод определения устойчивости растительных тканей к промораживанию. Петрозаводск: Карел. филиал АН СССР, 1982. 6 с.
32. Maxwell K., Giles N., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // J. Exp. Bot. 2000. V. 51. P. 659–668. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
33. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.L. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents // Biochem. Soc. Transact. 1983. V. 11. P. 591–593.
34. Chang C.Y.Y., Bräutigam K., Hüner N.P.A., Ensminger I. Champions of winter survival: cold acclimation and molecular regulation of cold hardiness in evergreen conifers // New Phytologist. 2021. V. 229. P. 675. <https://doi.org/10.1111/nph.16904>
35. Ensminger I., Busch F., Hüner N. Photostasis and cold acclimation: sensing low temperature through photosynthesis // Physiol. Plantarum. 2006. V. 126. P. 28. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00627.x>
36. Fürtauer L., Weiszmänn J., Weckwerth W., Nägele Th. Dynamics of plant metabolism during cold acclimation // Inter. J. Mol. Sci. 2019. V. 20. P. 5411. <https://doi.org/10.3390/ijms20215411>
37. Mahajan Sh., Tuteja N. Cold, salinity and drought stresses: an overview // Arch. Biochem. Biophys. 2005. V. 444. P. 139–158.
38. Moellering E.R., Muthan B., Benning Ch. Freezing tolerance in plants requires lipid remodeling at the outer chloroplast membrane // Science. 2010. V. 8. P. 226–228. <https://doi.org/10.1126/science.1191803>
39. John R., Anjum R.A., Sopory S.K., Akram N.A., Ashraf M. Some key physiological and molecular processes of cold acclimation // Biol. Plantarum. 2016. V. 60. P. 603–618.
40. Lu C.M., Qiu N.W., Wang B.C., Zhang J.H. Salinity treatment shows no effects on photosystem II photochemistry, but increases the resistance of photosystem II to heat stress in halophyte *Suaeda salsa* // J. Exp. Bot. 2003. V. 54. P. 851–860.
41. Cheng S., Yang Z., Wang M., Song J., Sui N., Fan H. Salinity improves chilling resistance in *Suaeda salsa* // Acta Physiol. Plantarum. 2014. V. 36. P. 1823–1830. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1555-3>
42. Лукаткин А.С., Башимаков Д.И., Липайкина Н.В. Протекторная роль обработки тидиазуоном проростков огурца при действии тяжелых металлов и

- охлаждения // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 3. С. 340–348.
43. Mahajan S., Tuteja N. Cold, salinity and drought stresses // Arch. Biochem. Biophys. 2005. V. 444. P. 139–158.
44. Ali B., Qian P., Jin R., Ali S., Khan M., Aziz R., Tian T., Zhou W. Physiological and ultrastructural changes in *Brassica napus* seedlings induced by cadmium stress // Biol. Plantarum. 2014. V. 58. P. 131–138. <https://doi.org/10.1007/s10535-013-0358-5>
45. Wang Y., Jiang X., Li K., Wu M., Zhang R., Zhang L., Chen G. Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses // Biometals. 2014. V. 27. P. 389–401. <https://doi.org/10.1007/s10534-014-9720-0>

Separate and Consistent Effect of Stress Factors of Different Nature on Photosynthetic Apparatus of Wheat

E. S. Kholoptseva^{a, #} and Yu. V. Venzhik^b

^a*Institute of Biology – a separate division of “Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” ul. Pushkinskaya 11, Petrozavodsk 185910, Russia*

^b*K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology of the RAS ul. Botanicheskaya 35, Moscow 127276, Russia*

[#]*E-mail: kholoptseva@krc.karelia.ru*

Constantly changing environmental conditions, climatic fluctuations and the increasing anthropogenic load on ecosystems force researchers to apply more and more diverse approaches to understand the adaptive capabilities of plant organisms. One of these approaches is a comparative analysis of the reaction of plants to the separate and sequential effects of stress factors of different nature. In this study, under controlled environmental conditions, changes in the photosynthetic apparatus (FSA) of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) were studied under the separate and sequential action of low temperature (4°C) and cadmium sulfate (100 mcM). It was found that exposure to only low temperature (7 days) caused a decrease in the intensity of net photosynthesis, the maximum quantum output of photosystem II (F_v/F_m) and stomatal conductivity, but the content of chlorophylls in wheat leaves increased. At the same time, the cold resistance of plants increased significantly, and consequently, the FSA was adapted to function at low temperatures. Sequential action of cadmium (24 hours) and low temperature (7 days). It further reduced the intensity of photosynthesis and stomatal conductivity, while the F_v/F_m indicators and the content of chlorophylls in wheat leaves changed to a lesser extent. In addition, an increase in the cold resistance of plants was observed, which, although small, was significantly higher than the initial level. Consequently, pretreatment with cadmium led to some “failure” of the cold adaptation program triggered by low temperature. Exposure to cadmium alone (7 days) reduced the intensity of net photosynthesis, the content of chlorophylls in the leaves and their stomatal conductivity, but did not affect the F_v/F_m index. At the same time, the cold resistance of plants also increased, apparently as a consequence of the “inclusion” of cross-adaptation mechanisms. The consistent action of low temperature (24 h) and cadmium (7 days) increased the negative effect of heavy metal on wheat FSA, significantly reducing the intensity of photosynthesis, stomatal conductivity of leaves, as well as the content of chlorophylls in them. In addition, the cold resistance of plants increased only during pretreatment with cold, and subsequently decreased to the initial level under the action of cadmium. It is shown that the nature of the response of plants to the action of stress factors depended not only on their nature, but also was determined by the type of pretreatment with their sequential application.

Key words: low temperature, cadmium, sequential action, cold resistance, photosynthetic apparatus, stomatal conductivity, *Triticum aestivum* L.

УДК 631.416.2:631.631.416.3:546.19:631.445

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЫШЬЯКА И ФОСФОРА В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ АМАРАНТА НА ПОЧВАХ РАЗНЫХ ТИПОВ

© 2022 г. М. А. Ефремова^{1,*}, Ф. Адимале¹

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601, Санкт-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

*E-mail: marina_efremova@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В лабораторном опыте на искусственно загрязненных мышьяком почвах (дерново-подзолистой среднесуглинистой почве (Albic Retisols, WRB) и солонце гидроморфном (Gleyic Solonetz Albic, WRB)) выращивали амарант (*Amaranthus cruentus* L.) для сравнительной оценки распределения фосфатов и As-содержащих соединений в почвах и выявления закономерностей накопления As растениями. В почвах был определен групповой и фракционный состав фосфатов и содержание As в полученных вытяжках. При увеличении содержания мышьяка в дерново-подзолистой почве масса амаранта существенно возрастала ($r = 0.90$). Мышьяк, внесенный в солонец, ингибировал рост амаранта ($r = -0.94$). Содержание металлоида в растениях на изученных почвах изменялось прямо пропорционально его содержанию в почве. Коэффициенты накопления As амарантом из солонца гидроморфного в среднем в опыте были больше в 3.3 раза, чем из дерново-подзолистой почвы. Содержание гидролизуемых фосфатов в дерново-подзолистой почве составило 52% от валового содержания фосфора, в солонце гидроморфном – 23%. При этом в солонце 77% гидролизуемых фосфатов входило в наиболее растворимые фракции однозамещенных и двухзамещенных фосфатов, в дерново-подзолистой почве – 49% активных фосфатов. Содержание гидролизуемых As-содержащих соединений в дерново-подзолистой почве было в 3.8 раза меньше, чем в солонце при сопоставимом валовом содержании элемента в обеих почвах. В целом это обеспечило высокую доступность As растениям амаранта на солонце по сравнению с дерново-подзолистой почвой.

Ключевые слова: мышьяк, групповой состав фосфатов, амарант, дерново-подзолистая почва, солонец гидроморфный.

DOI: 10.31857/S0002188122080051

ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения санитарно-гигиенической безопасности продукции растениеводства необходимо изучать влияние различных компонентов педосферы на поведение экотоксикантов в системе почва–растение. Мышьяк относится к токсикантам 1-го класса опасности. Его содержание в организме человека на 40% обусловлено потреблением продуктов, содержащих этот металлоид [1]. Таким образом, мышьяк мигрирует по пищевой цепи, первоначально накапливаясь в растениях.

Фоновые уровни содержания As в почвах мира варьируют от 0.1 до 95 мг/кг [2, 3]. Распределение мышьяка в системе почва–растение зависит от свойств почвы, в которой элемент может находиться в виде индивидуальных химических соединений различной растворимости, в адсорбирован-

ном состоянии, в составе первичных и вторичных минералов, в соединениях с органическими веществами. А.И. Перельман отнес мышьяк к слабоподвижным элементам [4]. Комплексные анионы AsO_2^- , AsO_4^{3-} , HAsO_2^- , H_2AsO_3^- рассматриваются как подвижные формы As в почве [3], из них наиболее распространенная форма соединений мышьяка в условиях окружающей среды – арсенат-ион (AsO_4^{3-}); мышьяк в форме арсенит-иона (AsO_3^{3-}) доминирует при низких показателях окислительно-восстановительного потенциала и pH почвы. Показано, что величина показателя pH почвы оказывает важнейшее влияние на накопление мышьяка растениями из почвы [3, 5]. При этом в почвенных условиях с близкими величинами pH мышьяк менее доступен растениям из почвы с аэробной средой и высоким окислительно-вос-

Таблица 1. Схема опыта

Вариант	Доза* As, мг/кг абсолютно-сухой почвы	Валовое содержание As в почве после загрязнения (C_n), мг/кг абсолютно сухой почвы	
		дпп**	солонец
1. $N_{200}P_{250}K_{250}$ (фон)	—	5.2	4.4
2. Фон + As_1	2	7.2	6.4
3. Фон + As_2	4	9.2	8.4
4. Фон + As_3	6	11.2	10.4
5. Фон + As_4	8	13.2	12.4
6. Фон + As_5	10	15.2	14.4

*Доза — количество As, внесенное в почву при закладке опыта.

**дпп — дерново-подзолистая почва.

становительным потенциалом, чем из почвы с анаэробной средой.

Мышьяк может удерживаться в твердой фазе почвы полутормными оксидами железа и алюминия путем осаждения с ними [6, 7], а также органическим веществом [8]. Гидроксиды железа наиболее активно удерживают мышьяк при pH 8.0, гидроксиды алюминия — при pH 4.0. В аналогичных условиях сорбируется почти в 3 раза больше арсенат-ионов, чем арсенит-ионов. Адсорбция As гуминовыми кислотами высока в диапазоне pH 5.0–7.0, а также при большом содержании кальция в гуминовых кислотах [9–12]. В кислой среде гуминовые кислоты могут внести больший вклад в удержание As, чем глинистые минералы и оксиды металлов [13, 14].

На поведение микроэлементов в системе почва–растение существенное влияние оказывают их химические элементы-аналоги. Химические свойства фосфора и мышьяка схожи. Элементы входят в 5-ю группу периодической системы, имеют близкие размеры атомного радиуса, величины потенциала ионизации и электроотрицательности. Оба элемента образуют оксианионы в степени окисления +5. Согласно литературным данным [6], мышьяк поступает в корневую систему растений в форме арсенатов, которые нарушают метаболизм фосфатов в организме растений (фосфорилирование и синтез АТФ). Доказательством схожести геохимического поведения мышьяка и фосфора является тот факт, что в фосфатных горных породах относительно высоко содержание As (от 6.6 до 121 мг/кг) по сравнению со средним содержанием мышьяка в нефосфатных породах (от 1.8 до 6.6 мг/кг) [2]. Фосфаты способны конкурировать с As за места сорбции в почвенной среде в экологически важных диапазонах pH [15, 16]. По данным [16, 17], конкуренция со

стороны анионов PO_4^{3-} препятствует прочному закреплению оксианионов мышьяка при адсорбции частицами гидроксидов железа. Увеличение подвижности мышьяка в почве при возрастании содержания в ней фосфатов способствует накоплению металлоида растениями [18]. По другим данным, фосфор способствует снижению накопления растениями мышьяка из почвы [2, 3].

Цель работы — сравнительная оценка распределения фосфатов и As-содержащих соединений в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы (Albic Retisols, WRB) и солонца гидроморфного (Gleyic Solonetz Albic, WRB) и выявление закономерностей накопления As растениями амаранта (*Amaranthus cruentus* L.) из этих почв.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыт по исследованию накопления As амарантом из дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы и солонца гидроморфного был заложен в лабораторных условиях. Схема опыта состояла из 6-ти вариантов, в которых были созданы различные уровни загрязнения почвы мышьяком (табл. 1). Опыт проводили в пластиковых сосудах, масса абсолютно сухой почвы в каждом сосуде составляла 300 г. Повторность опыта трехкратная.

Валовое содержание мышьяка в почвах, отобранных для опыта, было больше предельно-допустимой концентрации элемента (ПДК) более чем в 2 раза и составляло в солонце 4.4 мг/кг почвы, в дерново-подзолистой почве — 5.2 мг/кг. Искусственное загрязнение почв экотоксикантом создавали на 5-ти уровнях за счет внесения в почву раствора Na_3AsO_3 . В результате, валовое содержание As в почвах опыта превышало ПДК элемента в 2–7 раз.

Таблица 2. Характеристика водной вытяжки солонца гидроморфного

Сухой остаток	Прокаленный остаток	Анионы				Катионы				
		HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	Σ	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Σ
%		ммоль/100 г почвы								
0.24	0.09	0.92	0.88	1.77	3.57	0.62	0.27	2.39	0.55	3.83

Согласно литературным данным, овощные виды амаранта, к которым относится и *Amaranthus cruentus* L., требуют высокого уровня удобренности почвы [19]. В связи с этим в качестве фона в почву были внесены минеральные удобрения (мочевина, простой суперфосфат и калий сернокислый) в дозах, рекомендованных для выращивания овощных культур в вегетационных опытах [20]. После загрязнения мышьяком и внесения удобрений почву инкубировали в течение 1 мес. при комнатной температуре в лабораторном помещении, влажность почвы в течение опыта поддерживали на уровне 70% ПВ. Далее в сосуды были высеяны семена амаранта. После прорастания амаранта в каждом сосуде было оставлено по 10 растений. Уборку амаранта проводили на 27-е сут вегетации. После уборки и учета массы растений в каждом опытном варианте составляли объединенную растительную пробу для определения содержания мышьяка. К химическому анализу растения были подготовлены путем мокрого озоления в смеси концентрированных кислот HNO_3 и HClO_4 (1 : 5). Содержание As в подготовленных растворах определяли на атомно-абсорбционном спектрометре Varian AAS-240 VGA-77. Коэффициент накопления (КН) As амарантом определен как отношение содержания элемента в абсолютно сухой массе растений к валовому содержанию в абсолютно сухой почве. Вынос элемента растениями из почвы рассчитан как произведение их массы в сосуде на содержание в них мышьяка.

В почвах 2-х вариантов опыта, загрязненных мышьяком в количестве 6 и 10 мг/кг, был определен групповой и фракционный состав фосфатов (по методу Гинзбург и Лебедевой) [21]. Фосфаты последовательно извлекали из почвы различными растворителями. В ходе анализа сначала выделяли фракцию наиболее растворимых форм фосфатов щелочных и щелочноземельных элементов (Ca-P_1 — аммонийно-молибдатная вытяжка). Затем извлекали фракцию менее растворимых форм фосфатов, связанных с кальцием и магнием, а также с закисными формами железа (Ca-P_{II} — ацетатно-молибдатная вытяжка). После этого выделяли фосфаты, связанные с алюминием и железом (Al-P , Fe-P — фтораммонийная и щелоч-

ная вытяжки соответственно) и, наконец, фракцию высокоосновных труднорастворимых фосфатов (Ca-P_{III} — сернокислая вытяжка). Фосфаты всех вышеуказанных вытяжек в сумме относят к гидролизуемым или активным фосфатам почвы. Наименее растворимая часть фосфатов, оставшаяся в почве после всех химических обработок, — это негидролизующиеся фосфаты. В выделенных фракциях было определено содержание мышьяка на эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой “Оптим-2100 DV”.

Основные результаты, полученные в исследовании, подвергали математической обработке методами корреляционного и дисперсионного анализов.

Для постановки опыта использовали солонец гидроморфный луговой нитратный высокосолончаковатый слабозасоленный глубокий малогумусный глыбистый легкого гранулометрического состава [22]. Почва для опыта была отобрана на участке приморской низменности Бенина с глубиной залегания грунтовых вод ≈ 3 м от поверхности и верхней границей солевых выделений на уровне 48 см от поверхности. Почва была извлечена из надсолонцового пахотного горизонта глубиной 18–20 см. Содержание органических веществ в солонце было низким (0.88%), $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 8.4, содержание обменного Na — 7.85 ммоль(экв)/100 г почвы, емкость катионного поглощения почвы — 23.5 ммоль(экв)/100 г [23]. Содержание подвижных соединений фосфора и калия в почве составляло соответственно: 543 мг P_2O_5 /кг и 215 мг K_2O /кг почвы. Очень высокое содержание фосфора могло быть связано с насыщенностью верхнего горизонта почвы остатками раковин морских животных. Для солонца характерен нитратный тип засоления (табл. 2), анионы CO_3^{2-} и SO_4^{2-} в водной вытяжке не обнаружены. Среди водорастворимых веществ почвы большая доля приходилась на органические вещества — $\approx 62\%$.

Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва была отобрана для опыта в Гатчинском р-не Ленинградской обл. из пахотного горизонта, мощность которого составляла 27 см. Агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы

Таблица 3. Воздушно-сухая масса амаранта и показатели накопления As амарантом из дерново-подзолистой почвы и солонца гидроморфного

Вариант	Дерново-подзолистая почва			Солонец гидроморфный		
	M_p , г/сосуд	C_p , мг/кг	A_p , мкг/сосуд	M_p , г/сосуд	C_p , мг/кг	A_p , мкг/сосуд
1. NPK (фон)	0.067	—	—	0.247	—	—
2. Фон + As ₁	0.071	0.02	0.001	0.168	0.06	0.010
3. Фон + As ₂	0.111	0.09	0.010	0.140	0.43	0.060
4. Фон + As ₃	0.227	0.17	0.039	0.106	0.65	0.069
5. Фон + As ₄	0.202	0.26	0.053	0.096	0.65	0.062
6. Фон + As ₅	0.212	0.32	0.068	0.083	0.80	0.066
Среднее	0.148	0.17	0.034	0.140	0.52	0.053
σ^*	0.074	0.12	0.028	0.061	0.29	0.024
HCP_{05}	0.083	—	—	0.127	—	—
r (от M_p)	—	0.85	0.89	—	–0.98	–0.83
r (от C_p)	0.90	1.0	0.99	–0.94	0.93	0.74

Примечание. M_p – абсолютно-сухая масса растений, C_p – содержание As в растениях (в пересчете на абсолютно-сухую массу), A – вынос As растениями, σ – стандартное отклонение, r (от C_p) – коэффициент корреляционной связи каждого показателя и валового содержания As в почве.

были определены по методикам ГОСТ. Почва хорошо окультурена, для нее характерны повышенное содержание органического вещества (4.9%), нейтральная реакция среды (pH_{KCl} 6.2), очень высокое содержание подвижного фосфора – 350 мг/кг и высокое содержание обменного калия – 185 мг/кг. Емкость катионного поглощения почвы составляла 20 ммоль(экв)/100 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Масса амаранта, выращенного на дерново-подзолистой почве (табл. 3), увеличивалась при возрастании содержания в ней мышьяка ($r = 0.90$). Эффект стимуляции роста растений под действием мышьяка наблюдали и ранее [15]. Предполагается, что он частично обусловлен стерилизацией почвы, уничтожением патогенной микрофлоры. Достоверное увеличение массы амаранта в опыте отмечено, начиная с варианта, где доза внесения As составила 6 мг/кг почвы, а общее содержание элемента равно 10.4 мг/кг абсолютно сухой почвы.

Мышьяк, внесенный в солонец, ингибировал рост амаранта, масса растений снижалась при увеличении содержания As в почве ($r = -0.94$). При загрязнении этой почвы мышьяком в дозе 2 мг/кг (валовое содержание As равно 6.4 мг/кг) фитотоксический эффект составил 32%, достоверное снижение массы растений (57%) зафиксировано при загрязнении почвы мышьяком в количестве 6 мг/кг почвы.

Таким образом, несмотря на то что валовое содержание мышьяка в солонце гидроморфном и дерново-подзолистой почве было сопоставимым, фитотоксичность мышьяка проявилась только на солонце.

Содержание мышьяка в растениях амаранта на дерново-подзолистой почве было в среднем в 3 раза меньше, чем на солонце. Доступное для растений количество этого микроэлемента в солонце могло быть больше, чем в дерново-подзолистой почве из-за значительной щелочности почвенной среды, в которой мышьяк подвижнее в условиях хорошей аэрации обеих почв [24], созданных при проведении опыта. Кроме этого, в дерново-подзолистой почве значительно больше содержание органического вещества, которое играло существенную роль в сорбции мышьяка [3]. Следует добавить, что произрастающие на солонце растения были ослаблены солевым стрессом, и это, вероятно, снижало избирательную способность корневой системы растений по отношению к токсичному элементу.

Концентрация As в растениях амаранта возрастала прямо пропорционально валовому содержанию металлоида как в дерново-подзолистой почве ($r = 1.0$), так и в солонце ($r = 0.93$).

Связь между коэффициентами накопления мышьяка амарантом и валовым содержанием элемента в дерново-подзолистой почве также описали прямолинейной зависимостью (рис. 1), корреляционная связь между этими показателя-

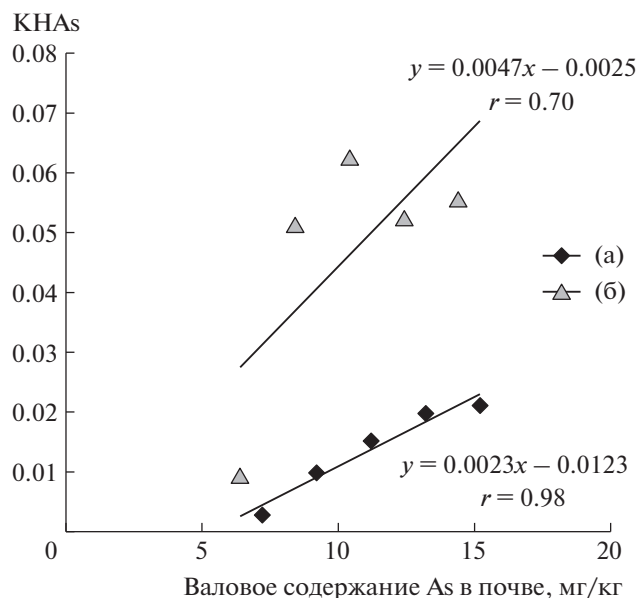


Рис. 1. Зависимость коэффициентов накопления As амарантом от его валового содержания в почве (а — дерново-подзолистая почва, б — солонец).

ми была тесной ($r = 0.98$), существенная на 5%-ном уровне значимости. Для солонца линейная зависимость между данными показателями была менее выражена, корреляционная связь несущественна. При увеличении валового содержания мышьяка в солонце > 10.4 мг/кг концентрация As в растениях, коэффициент накопления и вынос этого элемента амарантом не изменялись на фоне снижения массы растений.

Согласно литературным данным [5, 15–18], поведение химических элементов-аналогов —

фосфора и мышьяка в системе почва—растение имеет общие черты, что способствует изучению механизма распределения мышьяка в почве через распределение фосфора. В двух вариантах опыта, при загрязнении почвы As в дозах 6 и 10 мг/кг почвы определили фракционный и групповой состав фосфатов. Увеличение загрязнения дерново-подзолистой почвы мышьяком привело к возрастанию 2-х активных фракций гидролизумых фосфатов: однозамещенных фосфатов кальция (Ca-P_1) и фосфатов алюминия (Al-P). Наиболее заметно, в 2.5 раза, возросло содержание однозамещенных фосфатов (табл. 4). Сравнительный анализ этих данных позволил предположить, что внесение мышьяка в дерново-подзолистую почву способствовало снижению активности сообщества микроорганизмов, в том числе микроорганизмов, мобилизующих фосфор из почвы. В итоге, в варианте с более высокой степенью загрязнения почвы мышьяком для растений стала доступной более значимая, с точки зрения их питания, доля общего количества макроэлемента. В этих условиях достоверно возросла масса амаранта (табл. 3).

В среднем в 2-х вариантах отмечено высокое содержание гидролизумых фосфатов в дерново-подзолистой почве — 52.2% от общего содержания почвенных фосфатов (рис. 2), что объясняется внесением удобрений. Гидролизумые фосфаты были относительно равномерно распределены по выделенным фракциям (рис. 3).

Несмотря на применение удобрений на солонце, в групповом составе фосфатов гидролизумые соединения фосфора составили только 23% (рис. 2). Количество негидролизумых фосфатов в солон-

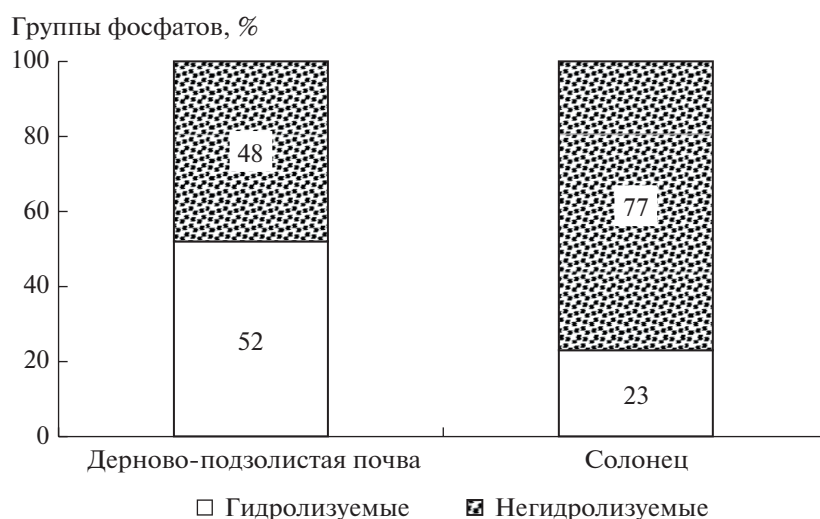


Рис. 2. Групповой состав фосфатов почв разных типов (% от валового содержания фосфора в почве): (а) — дерново-подзолистая почва, (б) — солонец.

Таблица 4. Фракции фосфатов и As-содержащих соединений в почвах разных типов

Доза As, мг/кг почвы	Вытяжки										Σ
	аммонийно-молибдатная	ацетатно-молибдатная	фтор-аммонийная	щелочная	сернокислая						
	Ca-P _I	Ca-P _{II}	Al-P	Fe-P	Ca-P _{III}						
Фосфаты											
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва											
	мг/кг	%*	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг
6	214	7.2	454	15.2	213	7.1	251	8.4	395	13.2	1527
10	534	17.8	334	11.2	245	8.2	219	7.3	267	8.9	1599
Среднее	374	12.5	394	13.2	229	7.6	235	7.9	331	11.0	1563
σ	226	—	85	—	23	—	23		90	—	51
Солонец гидроморфный											
6	533	9.4	517	9.1	182	3.2	25.8	0.4	93.8	1.6	1352
10	533	9.4	493	8.7	164	2.9	18.7	0.3	90.6	1.6	1299
Среднее	533	9.4	517	9.1	182	3.2	25.8	0.4	93.8	1.6	1352
σ	0.0	—	17	—	13	—	5.0	—	2.3	—	38
As-содержащие соединения											
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва											
	мг/кг	%*	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг
6	1.8	16.2	—**	—	—	—	—	—	1.5	13.4	3.3
10	1.2	7.8	—	—	—	—	—	—	1.5	9.7	2.7
Среднее	1.5	12.0	—	—	—	—	—	—	1.5	11.5	3.0
σ	0.5	5.9	—	—	—	—	—	—	0.0	—	0.4
Солонец гидроморфный											
6	9.7	93.6	—	—	—	—	—	—	—	—	9.7
10	9.9	68.8	—	—	—	—	0.7	4.9	1.7	11.5	12.3
Среднее	9.8	81.2	—	—	—	—	—	—	—	—	11.0
σ	0.1	17.5	—	—	—	—	—	—	—	—	1.8

*Приведена доля от валового содержания элемента в почве, %.

**As не обнаружен.

це было в 3 раза больше, чем в дерново-подзолистой почве. Можно предположить, что запас нерастворимых соединений фосфора обеспечен большим содержанием в солонце обломков раковин морских животных, содержащих этот элемент в своем составе.

Среди гидролизующихся фосфатов в солонце гидроморфном наибольшую долю занимали их наиболее растворимые фракции: однозамещенные и двухзамещенные фосфаты, которые включали 77% активного фосфора почвы (рис. 3). Абсолютное содержание этих фракций фосфатов в солонце было в 1.4 раза больше, чем в дерново-подзолистой почве. По-видимому, к ним относятся не только фосфаты кальция, но в значительной степени — фосфаты натрия, т.к. этот эле-

мент преобладал в водной вытяжке из почвы (табл. 2).

Данные содержания мышьяка в вытяжках, выполненных по методу Гинзбург и Лебедевой, показали, что после загрязнения дерново-подзолистой почвы As прочно закрепился в ее твердой фазе, т.к. доля активных соединений As была невысокой и в среднем в 2-х вариантах опыта составила 23.5% (табл. 4). При этом мышьяк гидролизующихся соединений равномерно распределился между легкорастворимой фракцией однозамещенных фосфатов кальция и фракцией труднорастворимых трехосновных фосфатов кальция. Предположительно, к этим фракциям приурочены соответственно однозамещенные арсенаты (арсениты) кальция и трехзамещенные арсенаты.

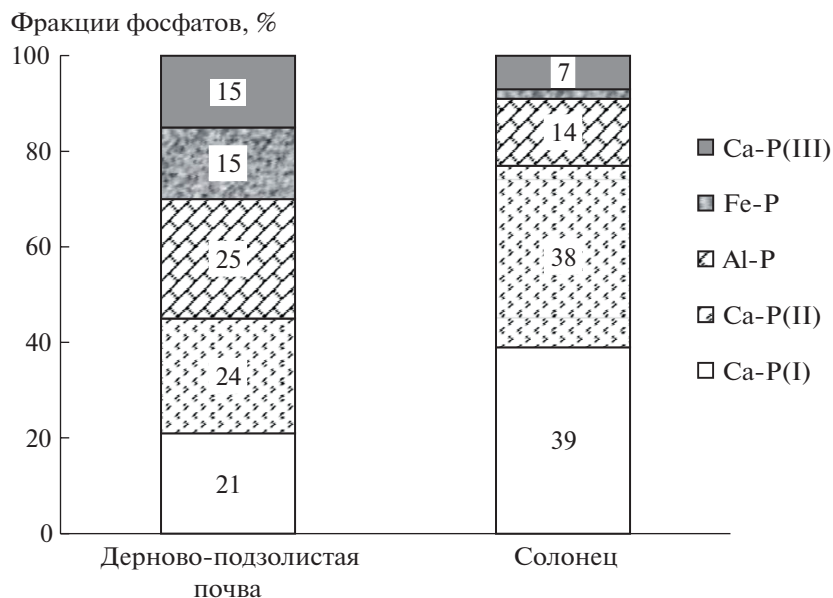


Рис. 3. Фракционный состав фосфатов в почвах разных типов, % от общего содержания гидролизуемых фосфатов.

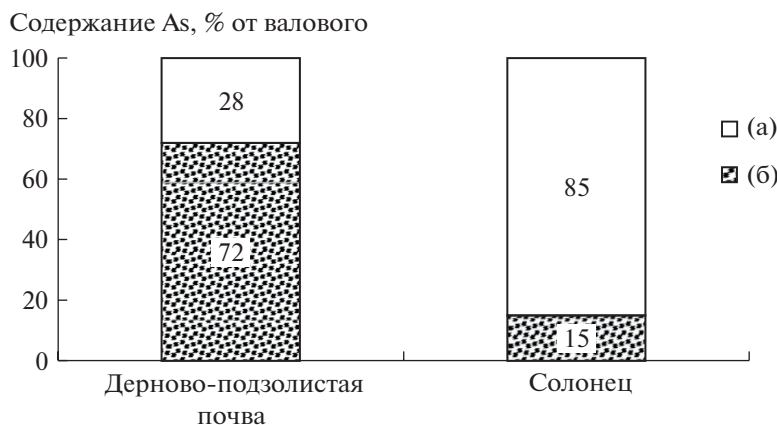


Рис. 4. Содержание мышьяка в разных группах фосфатов: (а) – гидролизуемые фосфаты, (б) – негидролизуемые фосфаты (на примере варианта с максимальным загрязнением почвы мышьяком).

Содержание микроэлемента в других фракциях было меньше предела обнаружения.

В варианте с максимальным загрязнением солонца мышьяком количество гидролизуемых соединений мышьяка составило 85% от общего содержания этого элемента в почве (рис. 4). Среди гидролизуемых соединений металлоида наиболее велика была доля As-содержащих соединений во фракции однозамещенных фосфатов почвы (рис. 5). Значительное содержание мышьяка в составе наиболее подвижной фракции было связано с высоким показателем pH почвы, что согласовалось с данными работы [24]. По-видимому, мышьяк этой фракции солонца был представлен однозамещенными арсенатами кальция и натрия.

В среднем в 2-х вариантах опыта количество гидролизуемых соединений As в солонце было в 3.8 раза больше, чем в дерново-подзолистой почве (рис. 4). Вследствие этого средняя в опыте величина КН As растениями амаранта на этой почве была в 3.4 раза больше, чем на дерново-подзолистой почве.

Так как масса амаранта, произрастающего на почвах 2-х типов, в среднем существенно не различалась (табл. 2), то на единицу массы растений на солонце в среднем приходилось в 6.5 раза больше легкоподвижного мышьяка (аммонийно-молибдатная вытяжка), чем на дерново-подзолистой почве.

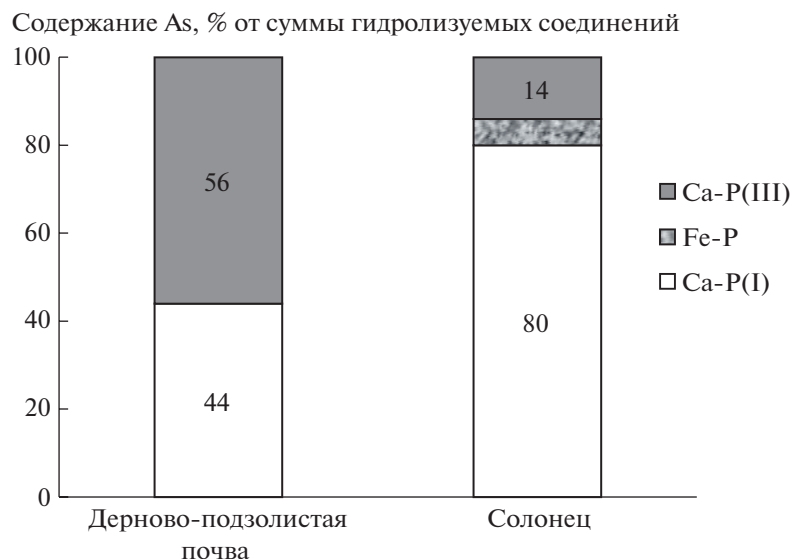


Рис. 5. Содержание мышьяка в разных фракциях гидролизуемых фосфатов (на примере варианта с максимальным загрязнением почвы мышьяком).

ВЫВОДЫ

1. При увеличении содержания мышьяка в дерново-подзолистой почве масса растений амаранта существенно возрастала ($r = 0.90$). Мышьяк, внесенный в солонец, ингибировал рост амаранта ($r = -0.94$), при этом достоверное снижение массы растений по отношению к контролю зарегистрировано при валовом содержании As в почве равном 10.4 мг/кг.

2. Содержание As в растениях амаранта как на дерново-подзолистой почве, так и на солонце, возрастало прямо пропорционально степени загрязнения почвы токсикантом ($r = 1.0$ и $r = 0.93$ соответственно).

3. Коэффициенты накопления As амарантом из солонца гидроморфного в среднем в опыте были в 3.3 раза больше, чем из дерново-подзолистой почвы. По-видимому, доступное для растений количество мышьяка в солонце гидроморфном было больше, чем в дерново-подзолистой средне-суглинистой почве из-за более высокого показателя pH солонца, более высокого содержания органического вещества в дерново-подзолистой почве, а также из-за условий солевого стресса, в которых оказались растения амаранта при выращивании на солонце.

4. Через 2 мес после внесения простого суперфосфата содержание гидролизуемых фосфатов в дерново-подзолистой почве составило 52% от валового содержания фосфора, в солонце гидроморфном — 23%. В солонце на долю наиболее растворимых фракций однозамещенных и двухзамещенных фосфатов пришлось 77% гидролизу-

емых фосфатов, в дерново-подзолистой почве — 49% активных фосфатов.

5. Содержание гидролизуемых As-содержащих соединений в дерново-подзолистой почве было в 3.8 раза меньше, чем в солонце гидроморфном при сопоставимом валовом содержании элемента в обеих почвах. В солонце однозамещенные соединения мышьяка составили 89% от общего количества гидролизуемых соединений металлоида. Вероятно, это обеспечило высокую доступность As растениям амаранта на солонце по сравнению с дерново-подзолистой почвой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Colangelo E.P., Guerinot M.L. Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants // Curr. Opin. Plant Biol. 2006. V. 9. P. 322–330.
2. Саркар Д., Датта Р. Концентрация и биодоступность мышьяка в почвах с разными свойствами: исследование почв во Флориде // Микроэлементы в окружающей среде: биогеохимия, биотехнология и биоремедиация / Под ред. Прасада М.Н.В., Саджвана К.С., Найдю Р. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С. 104–122.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Изд-во “Мир”, 1989. 439 с.
4. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 527 с.
5. Talukder A.S.M.H.M., Meisner C.A., Sarkar M.A.R., Islam M.S., Sayre K.D., Duxbury J.M., Lauren J.G. Effect of water management, arsenic and phosphorus levels on rice in a high-arsenic soil–water system: II. Arsenic uptake // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2012. V. 80. P. 145–151.

6. *Awasthi S., Chauhan R., Srivastava S., Tripathi R.D.* The journey of arsenic from soil to rice // *Front. Plant Sci.* V. 8: 1007. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01007>
7. *Jacobs L.W., Syers J.K., Keeney D.R.* Arsenic sorption by soils // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1970. V. 34. Is. 5. P. 750–754.
8. *Beesley L., Inneh O.S., Norton G.J., Moreno-Jimenez E., Pardo T., Clementer R., Dawson J.J.C.* Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil // *Environ. Pollut.* 2014. V. 186. P. 195–202.
9. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1982. 283 с.
10. *Hu H., Allard B., Grimvall A.* Influence of pH and organic substance on the adsorption of As(V) on geologic materials // *Water Air Soil Pollut.* 1988. V. 40. P. 293–305.
11. *Weng L., Van Riemsdijk W.H., Hiemstra T.* Effects of fulvic and humic acids on arsenate adsorption to goethite: experiments and modeling // *Environ. Sci. Technol.* 2009. V. 43(19). P. 7198–7204.
12. *Ильин В.Б., Сысо А.И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
13. *Thanabalasingam P., Pickering W.F.* Arsenic sorption by humic acids // *Environ. Pollut. Ser. B.* 1986. V. 12. P. 233–246.
14. *Zayre I., Gonzalez A., Krachler M., Cheburkin A.K., Shotyik W.* Spatial distribution of natural elements of arsenic, selenium, and uranium in a minerotrophic peatland, Cola di Lago, Canton Ticino, Switzerland // *Environ. Sci. Technol.* 2006. V. 40. P. 6568–6574.
15. *Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах* / Под ред. Зырина Н.Г., Садовниковой Л.К. М.: Изд-во МГУ, 1985. 208 с.
16. *Manning B.A., Goldberg S.* Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals // *Soil Sci. Amer. J.* 1996. V. 60. P. 121–131.
17. *Jackson B.P., Miller W.P.* Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides // *Soil Sci. Amer. J.* 2000. V. 64. P. 1616–1622.
18. *Cao X., Ma Lena Q.* Effects of compost and phosphate on plant arsenic accumulation from soils near pressure-treated wood // *Environ. Pollut.* 2004. V. 132. Is. 3. P. 435–442.
19. *Бреус И.П.* Продуктивность, химический состав и удобрение амаранта, выращиваемого на зеленую массу // *Агрохимия.* 1997. № 10. С. 62–74.
20. *Журбицкий З.И.* Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 266 с.
21. *Агрохимические методы исследования почв* / Под ред. Соколова А.В. М.: Наука, 1975. 656 с.
22. *Егоров В.В., Иванова Е.Н., Фридланд В.М., Розов Н.И.* Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.
23. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 244 с.
24. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высш. шк., 1988. 328 с.

Distribution of Arsenic and Phosphorus in the Soil–Plant System when Growing Amaranth on Different Types of Soils

M. A. Efremova^{a,*} and F. Adimale^a

^a *Sankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, Sankt-Petersburg–Pushkin 196601, Russia*

^{*}*E-mail: marina_efremova@mail.ru*

In laboratory experiment on artificially polluted arsenic soils (sod-podzolic medium loamy soil (Albic Retisols, WRB) and hydromorphic salt (Gleic Solonetz Albic, WRB)) amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) was grown to comparatively assess the distribution of phosphates and As-containing compounds in soils and to identify patterns of As accumulation by plants. The group and fractional composition of phosphates and the As content in the obtained extracts were determined in the soils. With an increase in the arsenic content in sod-podzolic soil, the mass of amaranth increased significantly ($r = 0.90$). Arsenic introduced into the salt shaker inhibited the growth of amaranth ($r = -0.94$). The metalloid content in plants on the studied soils varied in direct proportion to its content in the soil. The coefficients of accumulation of As by amaranth from hydromorphic salt on average in the experiment were 3.3 times greater than from sod-podzolic soil. The content of hydrolyzable phosphates in the sod-podzolic soil was 52% of the total phosphorus content, in the hydromorphic salt – 23%. At the same time, 77% of hydrolyzable phosphates in the salt lake were included in the most soluble fractions of single-substituted and double-substituted phosphates, 49% of active phosphates in sod-podzolic soil. The content of hydrolyzable As-containing compounds in sod-podzolic soil was 3.8 times less than in saline with a comparable gross content of the element in both soils. In general, this provided a high availability of As to amaranth plants on saline compared to sod-podzolic soil.

Key words: arsenic, group composition of phosphates, amaranth, sod-podzolic soil, hydromorphic salt.

УДК 577.112.3:581.1:631.416.8:546.73

СОДЕРЖАНИЕ АМИНОКИСЛОТ В РАСТЕНИЯХ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ СОДЕРЖАНИЯ КОБАЛЬТА В ПОЧВЕ¹

© 2022 г. Г. Я. Елькина

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

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.
После доработки 27.03.2022 г.
Принята к публикации 16.05.2022 г.

Изучили влияние кобальта на аминокислотный состав однолетних кормовых трав. Установлено, что в ответ на загрязнение почв в растениях увеличилось содержание азота и аминокислот в составе белков. Изменения в содержании аминокислот в овсе начались при содержании подвижного кобальта в почве 10,2, в горохе – 15,1 мг/кг, содержание кобальта в растениях при этом составило 2,5 и 16,6, мг/кг. Загрязнение вызвало рост относительного содержания аспарагиновой кислоты в обеих культурах и глутаминовой кислоты в биомассе овса. При среднем загрязнении кобальтом увеличилось относительное содержание пролина в горохе, в овсе произошло уменьшение его доли.

Ключевые слова: аминокислоты, горох, овес, кобальт, почва.

DOI: 10.31857/S0002188122080063

ВВЕДЕНИЕ

Кобальт относится к числу физиологически необходимых элементов для живых организмов. Микроэлемент активно влияет на физиологические процессы в растениях, особенно на азотный обмен. Важен он для жизни клубеньковых бактерий и фиксации ими молекулярного азота [1, 2]. При этом кобальт, как и другие тяжелые металлы (ТМ), в избыточном количестве вызывает ответные негативные реакции в растениях [3].

Ингибирующее действие ТМ связано с их влиянием на метаболические процессы в растениях. При поступлении ионов ТМ в клетки растений начинают функционировать механизмы их детоксикации, включающие в себя связывание ионов различными хелаторами (органическими кислотами, аминокислотами, глутатионом и фитохелатинами, металлотионеинами). Активация защитных ферментов, синтез металлсвязывающих соединений и стрессовых белков приводят к нарушениям в метаболизме азота, увеличивая и снижая его содержание в органах растений в за-

висимости от концентрации токсичного элемента и фазы ответной реакции [2, 4–6].

Изменения в содержании свободных аминокислот под воздействием ТМ свидетельствуют об участии их в синтезе стрессовых белков и отображают адаптивные реакции растительного организма. В качестве ответной реакции на стресс, в том числе и обусловленный ТМ, в растениях активно синтезируется пролин, являющийся полифункциональным стресс-протекторным соединением, направленным на поддержание метаболизма растительного организма на разных стадиях адаптационного процесса [5, 7, 8]. Специфической реакцией на воздействие ТМ является синтез металлсвязывающих соединений, обогащенных тиоловыми (–SH) группами – металлотионеинов и фитохелатинов, образованных с участием цистина [9].

Представленные изменения в содержании свободных аминокислот характерны для конкретного (тестируемого) периода развития растения. Определение аминокислотного состава белков кормовых трав в период уборки позволяет оценить результаты сложных метаболических процессов, выявить суммарный эффект воздействия элемента на синтез аминокислот с учетом изменений в развитии растений. Исследования по влиянию ТМ на аминокислотный состав рас-

¹ Работа выполнена по теме “Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем Европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов” (№ 1021051101421-1-1.6.19).

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

Вариант	Содержание кобальта в почве, мг/кг		Масса одного растения (воздушно-сухая), г		Выход сырого протеина на одно растение, мг	
	валовое	ААБ-вытяжка	горох	овес	горох	овес
Контроль	6.2	0.2	0.36 ± 0.05	0.40 ± 0.04	29.8	35.5
1	15.1	2.5	0.41 ± 0.04	0.47 ± 0.05	30.7	41.8
2	20.1	5.3	0.42 ± 0.04	0.50 ± 0.06	33.4	47.5
3	30.9	9.1	0.41 ± 0.04	0.53 ± 0.04	33.6	52.0
4	32.1	10.2	0.40 ± 0.04	0.52 ± 0.07	34.3	49.4
5	37.5	11.6	0.38 ± 0.03	0.55 ± 0.07	31.0	56.4
6	46.0	15.1	0.35 ± 0.03	0.57 ± 0.07	29.8	59.1
7	48.7	16.1	0.35 ± 0.02	0.59 ± 0.07	31.0	53.8
8	55.3	16.9	0.33 ± 0.03	0.54 ± 0.06	28.7	53.0
9	57.7	19.1	0.31 ± 0.02	0.52 ± 0.05	27.4	50.9
10	65.5	19.1	0.30 ± 0.02	0.50 ± 0.06	26.5	50.6

Примечания. 1. Нумерация вариантов та же в табл. 2. 2. “±” — стандартное отклонение.

тений, кормовую ценность продукции крайне незначительны. Показано увеличение содержания суммы аминокислот главным образом за счет пролина, аспарагиновой и глутаминовой кислот, снижение количества незаменимых аминокислот в зерне ячменя при избытке кадмия [4]. Загрязнение кадмием подзолистых почв приводило к росту содержания азота и аминокислот в составе белков биомассы кормовых культур, увеличению доли глутаминовой кислоты в белках гороха, аспарагиновой кислоты — в белках овса, снижению доли пролина в обоих видах растений [10].

Ранее нами были приведены исследования по влиянию кобальта на продуктивность кормовых трав на подзолистых почвах [11]. В низких концентрациях кобальт оказал стимулирующее действие на рост и развитие кормовых трав, при превышении оптимума происходило ингибирование и гибель растений.

Цель работы — изучение действия возрастающего содержания кобальта в почве на содержание азота и аминокислотный состав наземной массы однолетних трав.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели в микрополевым опыте в пригороде г. Сыктывкара на легкосуглинистой пахотной подзолистой почве в условиях искусственного загрязнения [11]. Разные по содержанию кобальта почвы были получены в результате смешивания ранее загрязненной почвы с почвой контроля. Почву весом 10 кг помещали в полиэтиленовые сосуды без дна (диаметр — 20, высота —

30 см), которые зарывали в траншеи. Эксперимент выполнен в четырехкратной повторности. Варианты опыта с различным содержанием кобальта в почве представлены в табл. 1.

В каждый сосуд высевали по 15 семян гороха (*Pisum sativum*) сорта Альбумен и овса (*Avena sativa*) сорта Львовский-82, оставляя впоследствии по 10 растений каждого вида. Отбор растительных проб (надземной биомассы) осуществляли в фазе образования бобов гороха и фазе колошения овса при учете продуктивности. Поскольку кобальт оказывал влияние на прохождение фенологических фаз и развитие репродуктивных органов, сроки уборки и отбора проб устанавливали по развитию растений в контроле.

Азот определяли методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-0). Относительная погрешность анализа при содержании азота 0.5–2.6% составляла 18.0%, при содержании 2.6–20% — 6.7%. Содержание аминокислот, входящих в состав белков растений, определяли методом жидкостной хроматографии на аминокислотном анализаторе ААА Т 339 М. Относительная погрешность анализа конкретных аминокислот (при $P = 0.95$) приведена в табл. 2. Гидролиз белков осуществляли в концентрированном растворе серной кислоты в запаянной ампуле при $t = 110^\circ\text{C}$. Анализы выполняли в аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии. Методы анализа растительных и почвенных образцов на содержание кобальта приведены в работе [11].

Таблица 2. Влияние кобальта на аминокислотный состав биомассы гороха и овса

Аминокислота	Варианты										Погреш- ность, %	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		10
Горох												
Аспарагиновая	0.48/11.1	0.48/10.9	0.52/11.0	0.55/11.3	0.55/11.1	0.55/10.9	0.58/11.0	0.68/11.7	0.72/11.9	0.73/12.2	0.71/11.8	16
Треонин	0.21/4.9	0.21/4.8	0.22/4.6	0.23/4.7	0.23/4.7	0.25/4.9	0.27/5.1	0.32/5.6	0.32/5.3	0.33/5.5	0.34/5.6	16
Серин	0.24/5.5	0.25/5.6	0.27/5.7	0.27/5.6	0.28.5.6	0.28/5.6	0.30/5.8	0.34/5.8	0.36/5.9	0.35/5.8	0.35/5.8	14
Глутаминовая	0.54/12.4	0.55/12.5	0.60/12.7	0.62/12.8	0.63/12.7	0.63/12.4	0.64/12.2	0.70/12.1	0.75/12.4	0.69/11.6	0.71/11.7	13
Пролин	0.38/8.7	0.40/9.1	0.44/9.3	0.46/9.4	0.49/10.0	0.48/9.5	0.52/9.9	0.52/8.9	0.50/8.2	0.53/8.9	0.55/9.1	31
Глицин	0.25/5.8	0.26/5.9	0.27/5.7	0.27/5.5	0.28/5.6	0.28/5.5	0.31/5.8	0.33/5.7	0.34/5.6	0.33/5.5	0.35/5.8	16
Аланин	0.29/6.6	0.28/6.4	0.31/6.6	0.32/6.5	0.31/6.3	0.32/6.3	0.34/6.5	0.35/6.1	0.37/6.0	0.376.2	0.38/6.3	19
Цистин	0.000/0.0	0.000/0.0	0.000/0.0	0.000/0.0	0.002/0.04	0.002/0.04	0.002/0.04	0.002/0.03	0.002/0.03	0.003/0.05	0.003/0.05	
Валин	0.32/7.5	0.31/7.2	0.32/6.7	0.32/6.7	0.33/6.7	0.34/6.8	0.34/6.5	0.40/6.8	0.40/6.6	0.41/6.9	0.41/6.7	14
Метионин	0.005/0.12	0.005/0.11	0.007/0.15	0.005/0.10	0.006/0.12	0.005/0.10	0.007/0.13	0.007/0.20	0.007/0.20	0.005/0.08	0.007/0.20	
Изолейцин	0.21/4.9	0.22/5.0	0.24/5.0	0.24/4.9	0.25/5.2	0.27/5.3	0.28/5.2	0.30/5.2	0.33/5.4	0.32/5.3	0.31/5.2	12
Лейцин	0.35/8.1	0.34/7.8	0.37/7.7	0.39/8.0	0.39/7.9	0.40/8.0	0.44/8.4	0.45/7.8	0.49/8.1	0.49/8.1	0.52/8.6	13
Тирозин	0.22/5.0	0.23/5.3	0.28/5.9	0.27/5.5	0.26/5.3	0.30/6.0	0.29/5.5	0.34/5.9	0.35/5.7	0.32/5.3	0.31/5.1	20
Фенилаланин	0.21/4.8	0.22/5.0	0.21/4.6	0.24/4.9	0.23/4.7	0.25/4.9	0.24/4.5	0.28/4.8	0.29/4.8	0.27/4.5	0.28/4.6	16
Гистидин	0.08/1.9	0.09/2.1	0.09/2.0	0.09/1.9	0.09/1.8	0.10/1.9	0.10/1.8	0.11/1.9	0.12/1.9	0.13/2.2	0.12/2.0	19
Лизин	0.34/7.8	0.34/7.7	0.35/7.4	0.36/7.4	0.38/7.6	0.37/7.3	0.38/7.1	0.43/7.4	0.46/7.6	0.45/7.5	0.45/7.5	16
Аргинин	0.22/4.9	0.21/4.8	0.23/4.8	0.22/4.5	0.23/4.7	0.23/4.5	0.25/4.7	0.25/4.2	0.27/4.5	0.26/4.4	0.24/4.0	19
Сумма	4.35	4.39	4.72	4.82	4.93	5.06	5.27	5.80	6.05	5.98	6.03	
Содержание азота, %	1.21	1.20	1.26	1.31	1.36	1.30	1.36	1.40	1.38	1.40	1.41	10
Содержание кобальта, мг/кг	0.4	1.5	3.8	6.0	8.3	10.8	16.6	16.8	17.2	20.8	22.7	20

Таблица 2. Окончание

Аминокислота	Варианты										Погрешность, %	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		10
Овес												
Аспарагиновая	0.85/16.1	0.97/17.5	1.10/19.6	1.10/19.1	1.09/18.7	1.12/19.6	1.20/20.7	1.13/19.8	1.17/20.3	1.18/20.3	1.21/20.6	16
Треонин	0.20/3.8	0.22/4.0	0.22/3.9	0.23/3.9	0.23/4.0	0.22/3.8	0.23/4.0	0.22/3.8	0.23/4.0	0.23/3.9	0.23/4.0	16
Серин	0.21/4.1	0.23/4.1	0.23/4.1	0.25/4.3	0.25/4.2	0.24/4.2	0.23/3.9	0.24/4.2	0.24/4.1	0.24/4.2	0.26/4.4	14
Глутаминовая	0.62/11.6	0.63/11.3	0.67/11.9	0.68/11.9	0.73/12.6	0.74/12.9	0.77/13.3	0.80/14.0	0.81/14.0	0.81/14.0	0.81/13.9	13
Пролин	0.94/17.8	0.87/15.7	0.88/15.7	0.85/14.8	0.87/14.9	0.84/14.7	0.85/14.6	0.82/14.4	0.84/14.5	0.86/14.7	0.85/14.4	31
Глицин	0.22/4.1	0.24/4.3	0.23/4.1	0.24/4.2	0.24/4.1	0.23/4.0	0.23/3.9	0.23/4.1	0.23/4.0	0.23/3.9	0.23/4.0	16
Аланин	0.33/6.3	0.36/6.4	0.35/6.1	0.36/6.2	0.37/6.4	0.34/5.9	0.32/5.5	0.30/5.3	0.33/5.6	0.34/5.8	0.35/5.9	19
Цистин	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.00/0.0	0.002/0.04	0.002/0.04	0.001/0.04	0.001/0.02	0.001/0.02	
Валин	0.33/6.3	0.34/6.1	0.34/6.1	0.35/6.0	0.36/6.1	0.35/6.1	0.35/6.0	0.33/5.8	0.34/5.9	0.34/5.8	0.35/6.0	14
Метионин	0.008/0.15	0.003/0.05	0.005/0.09	0.010/0.17	0.009/0.15	0.008/0.14	0.019/0.33	0.008/0.14	0.009/0.16	0.022/0.38	0.007/0.12	
Изолейцин	0.20/3.8	0.21/3.7	0.20/3.6	0.21/3.7	0.21/3.7	0.20/3.5	0.20/3.5	0.18/3.1	0.15/2.6	0.19/3.2	0.15/2.6	12
Лейцин	0.34/6.4	0.37/6.6	0.30/5.3	0.33/5.7	0.34/5.8	0.35/6.1	0.33/5.7	0.36/6.3	0.36/6.3	0.35/5.9	0.36/6.1	13
Тирозин	0.23/4.4	0.25/4.5	0.23/4.1	0.25/4.4	0.26/4.5	0.24/4.3	0.23/4.0	0.25/4.4	0.24/4.1	0.25/4.3	0.26/4.5	20
Фенилаланин	0.22/4.1	0.24/4.2	0.23/4.1	0.24/4.2	0.25/4.2	0.25/4.4	0.24/4.1	0.23/4.0	0.24/4.1	0.23/3.9	0.22/3.8	16
Гистидин	0.08/1.6	0.10/1.7	0.09/1.6	0.09/1.6	0.09/1.5	0.08/1.4	0.08/1.4	0.08/1.4	0.10/1.6	0.09/1.6	0.08/1.3	19
Лизин	0.27/5.1	0.29/5.2	0.27/4.9	0.29/5.1	0.30/5.1	0.27/4.7	0.28/4.9	0.26/4.6	0.27/4.7	0.27/4.7	0.29/5.0	16
Аргинин	0.23/4.4	0.26/4.7	0.27/4.9	0.27/4.6	0.23/4.0	0.24/4.2	0.25/4.3	0.27/4.7	0.23/4.0	0.20/3.5	0.20/3.5	19
Сумма	5.28	5.55	5.62	5.75	5.82	5.72	5.81	5.69	5.79	5.81	5.86	
Содержание азота, %	1.36	1.43	1.52	1.56	1.51	1.64	1.67	1.47	1.58	1.57	1.62	10
Содержание кобальта, мг/кг	0.22	0.53	1.5	1.8	2.5	3.5	4.5	5.2	7.0	5.9	5.1	20

Примечание. Над чертой – содержание, г/100 г воздушно-сухой массы, под чертой – относительное содержание, %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое содержание кобальта в вариантах опыта изменялось с 6.2 в контроле до 65.5, подвижного (ацетатно-аммонийный буфер (ААБ)) — с 0.2 до 19.1 мг/кг. Стимулирующее действие элемента на растения гороха проявилось при содержании подвижного кобальта 5.3–10.2 мг/кг. В вариантах с большим количеством Со происходило постепенное снижение эффективности действия микроэлемента. Биомасса овса в вариантах с кобальтом превышала контроль на 17–47%. Тенденция к снижению продуктивности злаковой культуры по сравнению с максимальной происходила при содержании подвижного кобальта 19.1 мг/кг (табл. 1). Необходимо отметить, что смоделированные концентрации данного физиологически значимого элемента в эксперименте были выше оптимальных: в варианте 2 количество кобальта, экстрагируемое ААБ (5.3 мг/кг), превысило ПДК, равное 5.0 мг/кг [12].

Под влиянием кобальта в растениях активизировался процесс накопления азота. Количество его в наземной массе гороха (стебли, листья, бобы) увеличилось с 1.21 до 1.41%, овса — с 1.36 до 1.62% (табл. 2) пропорционально росту содержания кобальта в почве. Превышающие относительную погрешность анализа изменения в бобовом растении начались при содержании подвижного кобальта в почве, равном 10.2, в злаковом — 9.1 мг/кг. Содержание кобальта в надземной массе при этом составило соответственно 8.3 и 1.8 мг/кг. Количество азота в горохе положительно коррелировало с содержанием подвижного кобальта в почве ($r = 0.95$, $P < 0.001$), в овсе связи были менее тесные ($r = 0.71$, $P < 0.001$). Близкая зависимость обнаружена также между накоплением азота растениями и транслокацией кобальта в горох ($r = 0.93$, $P < 0.001$) и овес ($r = 0.61$, $P < 0.01$).

Анализ зависимости между формированием биомассы растений и синтезом азотсодержащих соединений показал, что для злакового растения взаимосвязи носили позитивный характер: биомассу овса и содержание в ней азота объединяла положительная корреляция средней силы ($r = 0.65$, $P < 0.01$), между тем как в бобовом растении зависимость была отрицательной ($r = -0.77$, $P < 0.001$). Интенсивный синтез азотистых соединений в горохе продолжался на фоне снижения продуктивности культуры.

Изменения в азотном цикле и продуктивности растений под влиянием кобальта сказались на количестве сырого протеина. Наибольшее его количество в бобовом растении отмечено при содержании подвижного кобальта в почве 5.3–10.2, в

злаковом растении — 9.1–15.1 мг/кг, при большем количестве элемента выход протеина снизился, оставаясь при этом больше контроля.

Нарушение стабильности белкового обмена, вызванное избыточным содержанием кобальта в почве, было ответной реакцией растений на стресс и результатом адаптации к сложившейся экологической ситуации. Изменения обусловлены нарушением процессов поглощения и транспорта азота, включением его в соединения, обеспечивающие защитные реакции растительного организма [5]. Тяжелые металлы могут приводить к увеличению содержания азота и белка в растениях. Показано снижение активности нитратредуктазы в присутствии ТМ и ингибирование процессов восстановления нитратов и накопления нитратного азота в органах растений [4, 6]. Наряду с ростом количества азота отмечали и снижение содержания азота в растениях, ингибирование азотного обмена под влиянием высоких концентраций ТМ [5].

С увеличением количества азота в надземной биомассе растений изменилось содержание практически всех аминокислот. Суммарное их количество в горохе повысилось с 4.35 до 6.03, в овсе — с 5.28 до 5.86 г/100 г. Сумма аминокислот положительно коррелировала с содержанием азота в горохе ($r = 0.96$, $P < 0.001$) и овсе ($r = 0.71$, $P < 0.001$), а также с количеством кобальта как в бобовой ($r = 0.91$, $P < 0.001$) так и злаковой ($r = 0.81$, $P < 0.001$) культуре. При этом связи между величиной биомассы и суммой аминокислот носили иной характер: положительный ($r = 0.72$, $P < 0.001$) для злакового растения и отрицательный — для бобового ($r = -0.90$, $P < 0.001$). Интенсивный синтез аминокислот в горохе, как и азотистых соединений, в целом продолжался при негативных изменениях продуктивной массы растений, обусловленных возрастающим содержанием кобальта в почве.

Увеличение суммарного содержания аминокислот в зерне ячменя под действием ТМ наблюдали и при возделывании на дерново-подзолистой почве. Наиболее существенные изменения при этом были характерны для пролина [4].

Значимые по сравнению с контролем изменения в содержании большинства аминокислот в биомассе гороха начались при содержании подвижного кобальта в почве 15.1 мг/кг, в растениях — 16.6 мг/кг (табл. 2). Содержание глутаминовой кислоты статистически значимо повысилось, начиная с содержания подвижного элемента 9.1 мг/кг. При содержании кобальта в ААБ-вытяжке >16 мг/кг в биомассе гороха в 1.5 раза увеличи-

лось содержание аспарагиновой кислоты, треонина, серина, изолейцина и тирозина, в 1.4 раза — пролина, лейцина и гистидина.

В злаковом растении в большей мере возросло количество аспарагиновой (в 1.4 раза) и глутаминовой (в 1.3 раза) кислот. Значимые изменения содержания аспарагиновой кислоты начались при более низком содержании кобальта в почве (5.3 мг/кг), чем для бобового растения. Доказанное повышение количества глутаминовой кислоты в биомассе овса происходило при содержании кобальта в почве >10.2 мг/кг, что достаточно близко к концентрациям, вызвавшим изменения в содержании аминокислоты в бобовом растении. Также доказано повышение количества серина и снижение — изолейцина, начиная с содержания кобальта в почве 16.1 мг/кг. Изменения в содержании остальных аминокислот в наземной массе овса находились в пределах погрешности, хотя и имели тенденцию к росту по мере повышения количества кобальта в почве. Уровень пролина, являющегося полифункциональным стресс-протекторным соединением [5, 7, 8], в злаковой культуре в отличие от бобовой в вариантах с кобальтом был меньше и составил 87–94% от его содержания в контроле, находясь при этом в пределах погрешности. В целом изменения в содержании аминокислот в биомассе овса были менее существенными, чем в бобовом растении.

С учетом роли метионина и цистина в синтезе металлсвязывающих соединений, необходимо отметить, что при содержании подвижного кобальта в почве 15.1 мг/кг и больше, в злаковом растении до 2-х раз возросло содержание метионина. Начиная с содержания кобальта в почве 10.2 мг/кг (для гороха) и соответственно 15.1 мг/кг (для овса) в биомассе растений был обнаружен цистин. Несмотря на изменения в содержании серосодержащих аминокислот достоверно утверждать о происходящих процессах не позволила примененная методика гидролиза белков, в результате которой возможны потери этих аминокислот. В этом случае можно говорить лишь о тенденции к росту их содержания.

Количественные изменения в содержании преобладающей части аминокислот были пропорциональны увеличившейся их сумме. Изменение относительного количества аминокислот (в % от их суммы) в большей мере, чем абсолютное содержание, позволяет определить участие отдельных из них в синтезе белков и других соединений, связанных с адаптацией растений к создавшимся в связи с загрязнением экологическим условиям. Относительное содержание аминокислот в кормовых культурах также дает

возможность оценить аминокислотный состав белков по питательной ценности.

Биомасса гороха в контроле по сравнению с овсом характеризовалась большим относительным содержанием большинства аминокислот, кроме аспарагиновой кислоты и пролина. В злаковом растении доля аспарагиновой кислоты в 1.5, пролина — в 2.0 раза превышала их количество в бобовом растении.

В бобовой культуре, исходя из относительного содержания аминокислот, преобладали глутаминовая и аспарагиновая кислоты, третье место занимал пролин (табл. 2). Доля глутаминовой кислоты в растениях во всех вариантах была достаточно постоянной и близкой к контролю. Некоторое снижение происходило при содержании кобальта в почве 19.1 мг/кг. Об отсутствии влияния возрастающего содержания кобальта на относительное количество этой аминокислоты можно судить по отрицательной корреляции как с содержанием подвижного кобальта в почве ($r = -0.71$, $P < 0.001$), так и с количеством его в растениях ($r = -0.81$, $P < 0.001$). При этом большим участием глутаминовой кислоты в синтезе белковых соединений характеризовались более продуктивные растения гороха, об этом свидетельствовала тесная положительная корреляция с биомассой ($r = 0.91$, $P < 0.001$).

Относительное содержание аспарагиновой кислоты в горохе с ростом уровня загрязнения и транслокации кобальта в растения повысилось с 11.1 до 12.2%, в большей мере при превышении содержания подвижного кобальта 16.1 мг/кг. Доля ее в составе аминокислот положительно коррелировала как с количеством кобальта в почве ($r = 0.75$, $P < 0.001$), так и в растениях ($r = 0.75$, $P < 0.001$). В связи с тем, что биомасса растений при значительном загрязнении Со была меньше, связи между ее величиной и долей аспарагиновой кислоты имели отрицательный характер ($r = -0.79$, $P < 0.001$).

Рост содержания аспарагиновой кислоты в растениях гороха в ответ на действие кобальта связан с тем, что эта аминокислота является источником азота для синтеза новых аминокислот [13], входящих в состав белков и соединений, способствующих интоксикации ТМ. Аналогичное увеличение доли аспарагиновой кислоты в биомассе гороха вследствие адаптационных процессов происходило и под действием меди и цинка [14, 15].

В противодействии на разные стрессовые явления (в т.ч. и загрязнение ТМ) в клетках растений активно синтезируется свободный пролин,

являющийся одним из компонентов общих (неспециализированных) клеточных защитных систем [5, 7, 8]. В связи с этим важно оценить долю пролина в белках растений. Максимальное относительное содержание пролина в биомассе гороха (9.5–10.0%) было характерно для растений, произраставших при содержании кобальта в почве от 10.2 до 15.1 мг/кг. При большем количестве кобальта доля пролина была близкой к контролю — 8.7% (табл. 2).

Одной из причин, наблюдаемого снижения относительного количества пролина в составе белков при высоком содержании кобальта в почве, могло быть ингибирование его биосинтеза вследствие избыточной транслокации элемента (16.8 мг/кг и более) в органы растений. Происходящие изменения могут быть связаны с различными фазами ответной реакции растительного организма на стресс (фазой адаптации и фазой повреждения), обусловленный ТМ [16]. Дисбаланс между синтезом и деструкцией пролина в результате ответных реакций на загрязнение почвы, на наш взгляд, и обусловил изменения в содержании аминокислоты в бобовом растении при переходе от фазы адаптации в фазу повреждения при высоких концентрациях кобальта в почве.

При содержании кобальта в почве, начиная с 10.2 мг/кг, в горохе активизировался синтез цистина. Доля его в составе белковых соединений положительно коррелировала с наличием кобальта в почве ($r = 0.87$, $P < 0.001$) и в растениях ($r = 0.88$, $P < 0.001$). Относительное количество пролина увеличилось до 0.05%, в то время как в контроле он не был установлен.

Тенденция к возрастанию синтеза цистина обусловлена тем, что ТМ в растениях могут связываться с соединениями, содержащими тиоловые группы, в т.ч. и с замещенным цистеином [17]. Цистеин же в свою очередь образуется в результате восстановления цистина. Синтез металлсвязывающих соединений с тиоловыми (—SH) группами в ответ на избыток ТМ является одним из наиболее специфических механизмов поддержания гомеостаза в растительной клетке [9].

С ростом содержания кобальта в горохе повысилась доля треонина, серина и изолейцина, связи между количеством этих аминокислот и содержанием элемента в почве и растениях имели положительный характер. Наряду с этим, начиная с содержания 5.3 мг Со/кг, уменьшилась доля валина, а при более высоком количестве кобальта в почве — лизина и аргенина, показатели объединяла отрицательная корреляция.

В злаковом растении в ответ на загрязнение наблюдали рост и абсолютного, и относительного содержания аспарагиновой кислоты (табл. 2). Доля ее в составе белковых соединений в биомассе овса увеличилась с 16.1 до 20.3–20.7%, положительно коррелируя с содержанием кобальта в почве ($r = 0.89$, $P < 0.001$) и в растениях ($r = 0.82$, $P < 0.001$). В составе белков продуктивных растений доля этой аминокислоты была более высокой ($r = 0.76$, $P < 0.001$). Возрастание участия аспарагиновой кислоты в синтезе белковых соединений наблюдали также при избытке меди и цинка [14, 15].

Наряду с аспарагиновой в злаковом растении увеличилось относительное содержание глутаминовой кислоты с 11.6 до 14.0% пропорционально росту содержания кобальта в почве ($r = 0.95$, $P < 0.001$) и в биомассе растений ($r = 0.97$, $P < 0.001$). Избыток меди в почве и растениях также вызвал увеличение доли глутаминовой кислоты в биомассе овса [14]. Усиленный ее синтез мог осуществляться за счет возросшей под действием ТМ активности глутаминсинтетазы [18].

Повышенный синтез глутаминовой кислоты в растениях овса, так же, как и аспарагиновой кислоты в обоих растениях был обусловлен их ролью в реакциях переаминирования [13]. Выступая в качестве источника азота, эти аминокислоты поддерживают синтез аминокислот, в том числе и тех, которые входят в состав белков и соединений, способствующих снижению токсичности ТМ. В частности, биосинтез пролина, одной из наиболее важных аминокислот для адаптации растений, осуществляется из глутамина, им же завершается и его деструкция [7, 19].

Относительное содержание пролина в белках овса при содержании кобальта в почве 9.1 мг/кг и больше снизилась с 17.8 до 14.4%, негативно коррелируя с наличием элемента в почве ($r = -0.83$, $P < 0.001$), в растениях ($r = -0.74$, $P < 0.001$) и с величиной биомассы ($r = -0.86$, $P < 0.001$). Уменьшение доли пролина с возрастанием стрессовой нагрузки возможно связано с тем, что содержание кобальта в почве и растениях превысило показатели, обеспечивавшие биосинтез пролина в параметрах, характерных для фазы адаптации.

Как и в бобовом растении в злаковом увеличилась доля цистеина и метионина. При содержании кобальта в почве 15.1–16.9 мг/кг относительное содержание цистина составило 0.03–0.04%. Доля метионина имела тенденцию к увеличению с 0.15 в контроле до 0.3–0.4% при превышении количества кобальта в почве 15.1 мг/кг. Тенденцию к увеличению содержания серосодержащих аминокислот наблюдали и при загрязнении дру-

гими ТМ [10, 14, 15]. Доля остальных аминокислот с повышением загрязнения кобальтом была меньше, их синтез и включение в состав белков в основном было подавлено.

Отсутствие существенных изменений в относительном содержании преобладающей части аминокислот (табл. 2) обусловлены генетической стабильностью аминокислотного состава белков. Непропорциональные изменения в содержании отдельных из них, которые наблюдали, свидетельствовали о вызванных при высоком содержании кобальта в почве и биомассе нарушениях в белковом обмене. Дестабилизация аминокислотного состава связана с экспрессией генов в ответ на стресс, в результате которой в растениях активизируется синтез стрессовых белков и металл-связывающих соединений [2, 5].

Кроме нестабильности синтеза аминокислот и белков вследствие защитно-приспособительных реакций в ответ на загрязнение кобальтом на аминокислотный состав растений повлияли изменения в фенологическом развитии и морфологии растений. Например, в структуре надземной части гороха с ростом концентрации кобальта в почве снизилась доля цветов и бобов. Вследствие изменений в соотношении между вегетативными и репродуктивными органами произошли изменения во фракционном и аминокислотном составе белков продуктивной массы [20].

Одним из важных показателей качества растительной продукции является наличие в белках незаменимых аминокислот. Абсолютное их содержание в биомассе гороха увеличилось с 1.66 до 2.31 г/100 г пропорционально росту содержания кобальта в почве ($r = 0.94$, $P < 0.001$) и растениях ($r = 0.95$, $P < 0.001$). В биомассе овса абсолютное содержание изменялось менее существенно (1.57–1.69 г/100 г). Более высокие показатели имели растения, произраставшие при содержании подвижного кобальта в почве от 9.1–15.1 мг/кг.

Относительное количество незаменимых кислот в наземной массе гороха было более стабильным — 36.2–38.3%. Корреляция между количеством аминокислот, не синтезируемых в животных организмах, и содержанием элемента в почве и растениях была менее значима ($r = 0.36$ – 0.47 , $P < 0.1$), чем для абсолютных величин. Доля незаменимых кислот в биомассе овса была меньше, чем в надземной массе гороха — 27.5–29.9%. Количество их в злаке незначительно снизилось с ростом содержания подвижного кобальта в почве и растениях ($r = -0.82$, $P < 0.001$).

В аминокислотном составе культур, в изменениях, вызванных загрязнением, отразились видо-

вые особенности растений. Надземная масса гороха отличалась более высоким относительным содержанием большинства аминокислот. Обе кормовые культуры в контроле имели достаточно близкое относительное содержание глутаминовой кислоты, на загрязненной кобальтом почве оно было существенно больше в белках злакового растения. Биомасса овса характеризовалась более высоким относительным содержанием аспарагиновой кислоты и пролина: различия по участию этих аминокислот в белках кормовых растений составили соответственно 1.5 и 2.0 раза. Возможно, что с высоким содержанием пролина в составе белков злакового растения в какой-то мере связана его большая толерантность по отношению к кобальту. В результате приспособительных реакций, обусловленных избытком кобальта, доля аспарагиновой кислоты в биомассе овса увеличилась в большей мере, чем в горохе. Доля пролина при загрязнении в злаковой культуре снизилась, в бобовой — повысилась.

Анализ аминокислотного состава белков кормовых трав позволил оценить результаты сложных процессов метаболизма азота, белковых соединений, выявить суммарный эффект воздействия кобальта на синтез аминокислот с учетом изменений в развитии растений, а также оценить качество растительной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что кобальт оказал значительное влияние на метаболизм азота в кормовых культурах, приводя в результате приспособительных реакций к росту содержания азота и суммы аминокислот. Интенсивность процессов определяли уровень загрязнения металлом и специфика культур. Количественные изменения в содержании преобладающей части аминокислот были пропорциональны увеличившейся их сумме. Вместе с тем в ответ на стресс произошел рост относительного содержания аспарагиновой в обеих культурах и глутаминовой кислоты в биомассе овса, снижение доли пролина в составе белковых соединений злаковой культуры. Более высокое содержание пролина отмечено в биомассе гороха при среднем загрязнении кобальтом. Значительного изменения количества незаменимых аминокислот в пределах изученных концентраций не произошло.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодин Б.А. Кобальт в жизни растений. М.: Наука, 1970. 343 с.

2. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
3. *Рак М.В., Пукалова Е.Н.* Кобальт в почвах и растениеводческой продукции Беларуси и эффективность применения кобальтовых удобрений // Почвоведение и агрохимия. 2016. № 2(57). С. 90–99.
4. *Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 5. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2001. 148 с.
5. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2014. 194 с.
6. *Бабкин В.В., Завалин А.А.* Физиолого-биологические аспекты действия тяжелых металлов на растения // Химия в сел. хоз-ве. 1995. № 5. С. 17–21.
7. *Кузнецов В.В., Шевякова Н.И.* Пролин при стрессе: биологическая роль, метаболизм, регуляция // Физиология растений. 1999. Т. 46. № 2. С. 321–336.
8. *Серёгин И.В., Иванов В.Б.* Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
9. *Серегин И.В.* Фитохелатины и их роль в детоксикации кадмия у высших растений // Усп. биол. химии. 2001. Т. 41. С. 283–300.
10. *Елькина Г.Я.* Влияние разных уровней загрязнения почвы кадмием на содержание аминокислот в растениях // Агрохимия, 2014. № 5. С. 72–78.
11. *Елькина Г.Я.* Кобальт в системе почва–растение на подзолистых почвах Европейского Северо-Востока России // Агрохимия. 2021. № 7. С. 75–82.
12. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве // Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. М., 2021. С. 389–391.
13. *Власюк П.А., Шкварук Н.М., Сапатый С.Е., Шамотиенко Г.Д.* Химические элементы и аминокислоты в жизни растений и человека. Киев: Наукова думка, 1974. 220 с.
14. *Елькина Г.Я.* Содержание аминокислот в растениях при разных уровнях содержания меди в почве // Агрохимия. 2018. № 12. С. 88–96.
15. *Елькина Г.Я.* Влияние различного содержания цинка в почве на аминокислотный состав биомассы кормовых трав // Агрохимия. 2020. № 4. С. 57–65.
16. *Селезнева Е.М., Гончарова Л.И., Белова Н.В.* Влияние кадмия на некоторые морфофизиологические и биохимические показатели ячменя // Агрохимия. 2008. № 4. С. 82–86.
17. *Дубинина Ю.Ю., Дульцева Г.Г., Палесский С.В., Скубневская Г.И.* Изучение химической природы защитной реакции растений на избыточное содержание кадмия в почве // Экол. химия, 2003. № 12. С. 41–46.
18. *Astolfi S., Zuchi S., Passera C.* Effect of cadmium on the metabolic activity of *Avena sativa* plants grown in soil or hidroponic culture // Biol. Plant. 2004. V. 48, № 3. P. 413–418.
19. *Wang Z., Yuan Y., Ou J., Lin Q., Zhang C.* Glutamine synthetase and glutamate dehydrogenase contribute differentially to proline accumulation in leaves of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings to different salinity // J. Plant Physiol. 2007. V. 164. P. 695–701.
20. *Измайлов С.Ф.* Азотный обмен в растениях. М.: Наука, 1986. 320 с.

Content of Amino Acids in Plants at Different Levels of Cobalt in the Soil

G. Ya. El'kina

*Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch, RAS
ul. Kommunisticheskaya 28, Syktyvkar 167982 Russia*

E-mail: elkina@ib.komisc.ru

The effect of cobalt on the amino acid composition of annual grasses has been studied. It has been found that the contents of nitrogen and amino acids in proteins increase in response to the contamination of soil with cobalt. Changes in amino acid content in oats begin at the mobility cobalt contents in the soil of 10.2 mg/kg, in peas 15.1 mg/kg respectively; the content of cobalt in plants reaches 2.5 и 16.6 mg/kg respectively. Contamination causes an increase in the relative content of aspartic acid in both plants and glutamic acid in oats proteins. Contamination of middle level causes an increase relative content in pea proteins and decrease in the oats proteins

Key words: amino acids, plants, cobalt, soil.

УДК 631.811.98:633.8

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОКСИКОРИЧНЫХ КИСЛОТ НА ЛЕКАРСТВЕННЫХ КУЛЬТУРАХ

© 2022 г. Н. И. Ковалев

Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений
117216 Москва, ул. Грина, 7, Россия
E-mail: kovalevteam@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.2022 г.
После доработки 28.03.2022 г.
Принята к публикации 16.05.2022 г.

В обзоре рассмотрены вопросы использования регуляторов роста на основе гидроксикоричных кислот в лекарственном растениеводстве. Многолетние исследования показали, что гидроксикоричные кислоты оказывают на растительный организм полифункциональное действие: способствуют активизации физиологических процессов в растениях, усиливают их рост и развитие. Кроме того, рострегуляторы на их основе повышают адаптационные свойства культурных растений к неблагоприятным факторам среды как абиотической (погодные условия), так и биотической природы (вредители и фитопатогены). Включение рострегуляторов на основе гидроксикоричных кислот является важной компонентой экологически безопасных и в то же время высокоэффективных технологий возделывания лекарственных культур.

Ключевые слова: регуляторы роста, лекарственные растения, фенольные соединения, гидроксикоричные кислоты.

DOI: 10.31857/S0002188122080099

ВВЕДЕНИЕ

Ключевая позиция в регуляции жизнедеятельности растений принадлежит не только природным фитогормонам, но и вторичным метаболитам. Фенольные соединения, в том числе фенолкарбоновые, или гидроксикоричные кислоты (ГКК) относятся к обширному и повсеместно распространенному классу фенольных соединений и играют активнейшую роль в процессах жизнедеятельности растительного организма. Выполняя различные функции в растениях, производные фенольных соединений (в частности, гидроксикоричные кислоты) оказывают положительное влияние на продуктивность и качество получаемого сырья сельскохозяйственных культур. Механизм действия гидроксикоричных кислот связан с изменением эндогенного уровня фитогормонов из класса ауксинов в растительном организме. Они обладают полифункциональностью, участвуя в таких важных для растений процессах как рост и дыхание. При освещении *транс*-формы ГКК преобразуются в более богатые энергией *цис*-формы. При обратном переходе происходит преобразование поглощенной энергии, которая используется, например, для улуч-

шения поступления воды или на иные физиологические процессы [1–3].

Интересно отметить, что первоначально было установлено значение гидроксикоричных кислот в целях лечения заболеваний человека благодаря их иммуномодулирующему действию. Одним из наиболее изученных и востребованных в данном направлении растений стала эхинацея пурпурная (*Echinacea purpurea* L.), основными биологически активными веществами которой являются полисахариды и производные оксикоричных кислот (кофейной, цикориевой и др.) [4–6]. Цикориевая и хлорогеновая кислоты, входящие в состав эхинацеи, имеют большое иммунологическое и фармакологическое значение и способны ингибировать интегразу вируса иммунодефицита человека. Как препараты эхинацеи пурпурной в целом, так и отдельные оксикоричные кислоты могут применяться в качестве радиопротекторных средств. К настоящему моменту разработаны методики получения производных кофейной кислоты из эхинацеи пурпурной и эхинацеи узколистной с помощью их культивирования *in vitro* [7–10].

В литературе имеются данные об участии кофейной кислоты в фотосинтетической деятельности, транспорте ассимилятов и в ростовой ак-

тивности растений картофеля. Их обработка кофейной кислотой способствовала повышению количества ауксинов (ИУК), увеличению массы клубней, объема корневой системы и площади листовой поверхности растений на фоне активизации фотосинтетической деятельности.

Способность гидроксикоричных кислот влиять на функционирование растительного организма широко используют в растениеводстве. В последние годы наблюдается постоянный рост объемов использования регуляторов роста растений фенольной природы, что объясняется их полифункциональным действием на растительный организм: они осуществляют контроль за прорастанием семян, их вегетативным развитием, ростом и развитием растений, способствуют ускоренному созреванию плодов, повышают устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды, а также отличаются высокой окупаемостью [1, 2, 11, 12].

Это соответствует общему направлению развития практики сельского хозяйства — все большее внимание уделяется использованию препаратов рострегулирующего и иммуномодулирующего действия, которые, оказывая положительное влияние на рост и развитие растений, активизируя физиологические и биохимические процессы, стимулируют защитные свойства растений, способствуют повышению урожайности сырья и улучшению его качества. Включение в современные технологии возделывания лекарственных культур регуляторов роста растений позволяет направленно регулировать отдельные этапы онтогенеза растений с целью максимальной мобилизации потенциала их биопродуктивности [13–15].

К настоящему моменту разработан и разрешен к применению ряд рострегулирующих препаратов на основе различных действующих веществ хвойных растений и лекарственных трав (тритерпеновые кислоты, дигидрокверцетин, флавоноиды, гидроксикоричные кислоты) [16]. В 2001 г. российской фирмой НЭСТ М на основе смеси гидроксикоричных кислот и их производных был разработан и зарегистрирован рострегулятор Циркон. Производство данного препарата основано на выделении биологически активных компонентов из растительного сырья (травы эхинацеи пурпурной) и не связано с процессом химического преобразования. Многолетние широкие опытные и производственные испытания Циркона на многих сельскохозяйственных культурах, в том числе лекарственных, показали его высокую эффективность на всех стадиях развития растительного организма — от предпосевной и предпосадочной обработки до уборки урожая [11]. Дан-

ный препарат применяется в сельском хозяйстве в малых нормах расхода (1–120 мл/га). Гидрокси-коричные кислоты, входящие в состав рострегулятора, естественным путем включаются в метаболизм растений и почвенной микрофлоры. При этом и в растениях, и в почве, и водоемах они довольно быстро метаболизируются. Например, период полураспада экзогенной хлорогеновой кислоты в клубнях картофеля равен 18 ч, листьях дурнишника — 24 ч, период полураспада кофейной кислоты в листьях виноградной лозы — всего 15 ч [17, 18].

Циркон обладает ростстимулирующим и рострегулирующим действием, связанным с активизацией фитогормонов и защитой ИУК через механизм ингибирования ауксиноксидазы. Кроме того, наряду с ростстимулирующим действием он проявляет свойства индуктора устойчивости к ряду заболеваний (в т.ч. вызываемых патогенными грибами из родов *Fusarium*, *Alternaria*, *Mucor*), кроме фунгицидных показывает антибактериальные и противовирусные свойства [19–21]. Под влиянием данного регулятора роста повышается активность фермента фенилаланинаммиаклиазы, что обеспечивает синтез фенилпропаноидных фитоалексинов, которые являются низкомолекулярными растительными антибиотиками, оказывающими подавляющее действие на патогены [22]. Эти свойства Циркона способствуют повышению иммунитета растений и их устойчивости к действию ионизирующего облучения, неблагоприятного температурного и водного режима, в стрессовых условиях восполняют недостаток биологически активных соединений иммуномодулирующего и адаптогенного характера, особенно в условиях засухи [1, 23, 24]. Кроме того, имеются сведения о том, что применение Циркона способствует повышению устойчивости растений в условиях загрязнения почвы токсикантами и снижению содержания тяжелых металлов в получаемой продукции за счет связывания их ионов в устойчивые комплексы и активизации ряда ферментов [25–27].

В данном обзоре приведены результаты применения гидроксикоричных кислот на лекарственных культурах в различных целях: от повышения качества посевного и посадочного материала, урожайности и качества лекарственного сырья до стимулирования адаптивного потенциала растений к абиотическим и биотическим факторам окружающей среды.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

Лекарственные культуры в большинстве своем отличаются неравномерным прорастанием семян, длительностью периода от посева до всходов, медленным ростом в начальные периоды онтогенеза. Особенно это характерно для многолетних культур, дающих на первом году вегетации лишь розетку листьев. Гормональное регулирование процессов прорастания семян связывается и с природными фитогормонами, и с вторичными метаболитами. Для получения полноценных всходов в технологиях возделывания ряда лекарственных культур предусмотрена обработка семян гиббереллином, который является природным фитогормоном и позволяет исключить трудоемкий и длительный процесс стратификации. Однако применение гиббереллина не всегда оказывает положительное влияние на растения — исследования, проведенные на серпухе венценосной, показали, что обработка семян данным регулятором роста, усиливая рост надземной части проростков, приводит к торможению роста их корневой системы. В то же время на синергизм в корнеобразовании при совместном применении ИУК и фенолкарбоновых (гидроксикоричных) кислот указано еще в ранней работе Турецкой и Гуськова. Использование комбинационных смесей природного фитогормона гиббереллина и вторичных метаболитов Циркона позволяет направлено регулировать отдельные этапы роста и развития растений, способствует более интенсивному росту как корневой системы проростков, так и надземной части растений [28–31].

Лабораторные и полевые испытания смеси гиббереллина (0.1%) и Циркона (0.05%) на серпухе венценосной показали положительное влияние рострегуляторов на всхожесть семян, при этом отрицательный эффект гиббереллина на рост корней снимался, наблюдали стимуляцию роста проростков в большей степени, чем каждым рострегулятором в отдельности. Всходы растений появлялись на 5–6 сут раньше, чем в контроле, в то время как при обработке одним Цирконом — на 2–3 сут. Густота стояния растений через 40 сут после посева превышала контроль в варианте с Цирконом на 21%, при совместном использовании Циркона и гиббереллина — на 34%. Через 50 сут после посева площадь ассимилирующей поверхности в этом варианте превышала контроль на 98%. Подобное совместное применение Циркона (0.01%) и гиббереллина (0.1%) позволило отказаться от стратификации семян ослинника двулетнего, способствовало раннему

появлению всходов, повышению на 78% густоты стояния, площадь ассимилирующей поверхности растений возрастала на 81%, масса растений — более чем в 2 раза [31]. Обработка семян белладонны смесью рострегуляторов гиббереллин + Циркон способствовала повышению у нестратифицированных семян энергии прорастания на 50 и всхожести — на 80%, при этом длина корней и высота надземной части проростков увеличивались в 1.86–2.00 раза. При данной предпосевной обработке увеличивалась густота стояния посевов, степень покрытия делянки культурой через 40 сут после посева превосходила контроль на 23–30%. За счет увеличения на 29% количества листьев, площади ассимилирующей поверхности на 13–37% и массы растений на 11%, урожайность травы белладонны в опытном варианте возрастала на 15% [32].

Предпосевная обработка различных лекарственных культур одним рострегулятором Циркон также показала положительные результаты. Применение биорегулятора при обработке семян валерианы лекарственной, копеечника альпийского, наперстянки шерстистой, белладонны в норме расхода 0.2–0.5 кг/га способствовало более раннему появлению массовых всходов (на 2–5 сут) и повышению густоты стояния лекарственных растений на 8–24%, а также усилению ростовых процессов проростков в начале вегетации. Необходимо отметить, что обработка семян копеечника альпийского и наперстянки шерстистой биорегулятором Циркон способствовала не только повышению энергии прорастания и всхожести семян, но и снижала зараженность семян патогенами на 12.9–23.8% [33, 34].

Семена женьшеня характеризуются длительным периодом покоя, для их прорастания необходима длительная двухэтапная стратификация. В работе [35] было показано, что дополнительная обработка стратифицированных семян женьшеня Цирконом обеспечивала повышение их всхожести на 11–20%, при этом стимулировались ростовые процессы.

Наибольший эффект от применения биорегуляторов на энергию прорастания и всхожесть наблюдали при обработке семян лекарственных культур с низкой исходной всхожестью. Известно, что при хранении семян лекарственных культур снижается их всхожесть. Например, обработка семян ноготков лекарственных с низкой всхожестью Цирконом обеспечила повышение энергии прорастания на 19, всхожести — на 15.4%, при высокой всхожести семян эти показатели составляли 4.3 и 4.5% соответственно. Наряду с повышением полевой всхожести под влиянием регулятора ро-

ста наблюдали усиление стартовых ростовых процессов, площадь ассимилирующей поверхности растений возрастала на 36–52% [36].

При размножении ряда лекарственных культур, как кустарниковых, так и травянистых, возникает необходимость применения рострегуляторов, способствующих усилению корнеобразования, лучшей приживаемости, стимуляции роста и развития растений. Одним из важных аспектов применения гидроксикоричных кислот является их использование при вегетативном размножении растений. В практике лекарственного растениеводства Циркон показал свою эффективность при черенковании, обработке корневых систем, пересадке растений за счет улучшения роста и развития корневых систем и повышения их адаптационных возможностей. Применение Циркона для замачивания зеленых черенков роз перед посадкой способствовало усилению процессов корнеобразования: на 2–4 сут сокращалась продолжительность укоренения, увеличивалось количество и средняя длина основных корней, а также усиливался рост и развитие надземной части черенков, выход укорененных черенков роз повышался на 11.6–33.1%. Использование Циркона оказалось более экономичным, чем применение ИМК, за счет сопоставимой эффективности при значительно меньшем расходе препарата. Кроме того, замачивание щитков перед окулировкой роз в растворе Циркона существенно увеличивало (на 12–30%) выход товарных саженцев по сравнению с контролем [37].

При обработке Цирконом (0.2 мл/л) зеленых черенков облепихи крушиновидной массовое образование корней отмечено на 7–9-е сут после высадки, в то время как в контроле в этот период наблюдали лишь единичное укоренение. Приживаемость саженцев в питомнике в варианте с биорегулятором была выше контрольной на 20–21% и составила 98–100%. При этом высота надземной части растений увеличивалась на 30–35, число скелетных ветвей — на 13–23%. За счет повышения приживаемости и усиления ростовых процессов выход стандартных саженцев увеличивался на 63–71%. Замачивание рассады Melissa лекарственной в 0.1%-ном растворе Циркона способствовало лучшей приживаемости растений в полевых условиях, высота растений увеличивалась по отношению к контролю на 14, урожайность культуры — на 23%. При заготовке корневых отпрысков шиповника наблюдали нарушение целостности корневой системы, для улучшения приживаемости корнеотпрысков некоторых слабоукореняемых сортов и получение саженцев за один вегетационный период применение Циркона было так-

же актуально. Приживаемость корнеотпрысков шиповника формы 1-6-3 (Башкирская) повышалась при замачивании в растворе Циркона (1 мл/л) на 14%, в дальнейшем наблюдалось усиление роста и развития саженцев: высота растений через 1.5 мес. превышала контроль на 41–43, через 2.5 мес. — на 14–23%, увеличивалось количество скелетных ветвей и выход стандартных саженцев [38].

Как и в случае с предпосевной обработкой семян, Циркон может усиливать эффект других рострегуляторов при вегетативном размножении растений в случае их комплексного использования. В селекции белладонны для сохранения перспективных сортообразцов и высокопродуктивных форм имеет значение вегетативное размножение. Совместное применение смеси рострегуляторов роста Циркон и Корневин (4(индол-3ил) масляной кислоты) при вегетативном размножении белладонны (*Atropa belladonna* L.) способно повышать приживаемость зеленых черенков культуры (до 47%), в то время как при раздельном применении данных регуляторов роста повышение составляло 20–27%. При этом смесь Циркона и Корневина благоприятно влияла и на биоморфологические показатели культуры: высота растений превышала контроль на 45, ассимилирующая поверхность и число боковых побегов — на 40% [39, 40].

Испытания нового рострегулирующего препарата ДваУ (к настоящему моменту не включен в “Список разрешенных к применению препаратов...”), действующими веществами которого являются индолил-масляная кислота и комплекс гидроксикоричных кислот, также показали эффективность препарата при вегетативном размножении лекарственных культур. Замачивание корневой поросли маклеи и рассады лапчатки белой в водном растворе ДваУ способствовало интенсивному корнеобразованию и активации ростовых процессов: приживаемость маклеи увеличивалась на 18–19, лапчатки белой — на 22–25%. Положительное действие биорегулятора отразилось как на росте корневой системы, так и надземной части растений. У маклеи суммарная длина корней увеличивалась по сравнению с контролем в 3.9 раза, число листьев — на 16, площадь листовой поверхности — на 21%. Биомасса надземной части растений лапчатки белой возрастала на 51%, масса корней — в 2 раза [41].

РЕГУЛИРОВАНИЕ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ КУЛЬТУР (УРОЖАЙНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В СЫРЬЕ)

Важной задачей лекарственного растениеводства является получение максимальной урожайности культур в сочетании с высоким содержанием биологически активных веществ в сырье. Регуляторы роста растений, в том числе на основе вторичных метаболитов, оказывают значительное влияние на синтез основных биологически активных веществ в лекарственных растениях [42].

Применение Циркона с целью повышения биопродуктивности оказалось эффективным на разных лекарственных культурах. Двукратное опрыскивание Цирконом посевов змееголовника молдавского в различных климатических зонах (Краснодарский край, Московская и Самарская обл.) способствовало более интенсивному росту и развитию культуры, к моменту уборки урожая высота растений превышала контрольный вариант на 16–23, кустистость — на 18–21%, при этом цветение растений наступало на 3–4 сут раньше, чем в контроле. Стимуляция ростовых процессов привела к повышению урожайности травы на 16–22% и повышению содержания в ней эфирного масла на 48–51% [43]. Применение Циркона при внекорневой обработке растений белладонны в первый год вегетации обеспечило активный рост и формирование ассимиляционного аппарата, площадь которого возрастала на 54%. Усиление роста и развития растений при использовании Циркона с микроудобрением Феровит повышало урожайность семян на 25–33% и позволило получать полноценные семена уже в первый год вегетации, ускоряя таким образом селекционный процесс [40]. Испытание Циркона на женьшене показало, что при обработке семян и вегетирующих растений их масса возрастала на 92, масса корней — на 89%, площадь листовой поверхности — в 1.5–2.5 раза, при этом гибель растений от корневых гнилей снижалась на 10%. Выход качественной рассады женьшеня в варианте применения Циркона возрастал в 1.2–1.4 раза [35, 44].

Наряду с усилением роста лекарственных культур, Циркон ускоряет прохождение фенофаз и способствует раннему и дружному созреванию семян. Учеты количества плодов (многосемянной ягоды) белладонны показали, что количество незрелых плодов в варианте с двукратной обработкой вегетирующих растений рострегулятором составляло 10.2%, в то время как в контроле — 25.8%. Количество незрелых корзинок календулы в варианте с биорегулятором снижалось в 3 раза.

В результате влияния рострегулятора урожайность семян белладонны повышалась на 56, календулы — на 62% [45]. Исследования, связанные с регулированием семенной продуктивности на копеечнике альпийском, показали, что действие рострегулятора Циркон способствовало повышению урожайности семян на 31%, а также их качества: массы 1000 шт. — на 12, всхожести — на 17% по сравнению с контролем [46]. Двукратная обработка кустов шиповника рострегулятором Эпин-экстра (80 мл/га) в фазе отрастания побегов и Цирконом (100 мл/га) в фазе цветения способствовала повышению завязываемости плодов по сравнению с контролем на 35–72% [47].

Важным показателем качества лекарственного сырья является содержание в нем биологически активных веществ. Изучение влияния Циркона на накопление биологически активных веществ показало, что под влиянием данного препарата их содержание увеличивалось в различных лекарственных культурах. У календулы лекарственной повышалось количество каротиноидов на 29.8, у белладонны алкалоидов — на 26, у наперстянки шерстистой ланатозида С — до 45, содержание эфирного масла в корнях валерианы — на 28%, а у пажитника сенного формировались семена с повышенным содержанием стероидных сапонинов (до 4.26% от сухой массы семян) [13, 34, 48].

Высокую эффективность показали комплексные обработки, включавшие применение Циркона с органо-минеральными и микроудобрениями. При совместном применении на шалфее лекарственном Циркона и органо-минерального удобрения ЭкоФус наблюдали повышение урожайности эфиромасличного сырья (листа): при первом укосе — на 1.4–1.99, при втором — на 0.30–0.48 ц/га. Включение в технологию возделывания шалфея лекарственного органо-минерального удобрения ЭкоФус с микроудобрением Цитовит (1-я обработка) и микроудобрения Силиплант с регулятором роста Циркон (2-я обработка) позволило регулировать процессы роста и получать стабильные урожаи 2-х видов лекарственного сырья (трава и корни). По сумме 2-х укосов урожайность надземной части (травы) превышала контроль на 23%. Кроме того, активный синтез ауксинов под влиянием кремния (микроудобрение Силиплант), на фоне их меньшего разрушения при действии гидроксикоричных кислот (рострегулятор Циркон) позволил обеспечить лучший рост корневой системы шалфея и повышение его урожайности по сравнению с контролем на 40% [49, 50].

На синюхе голубой обработка бинарной смесью Циркона с микроудобрением Силиплант

оказала стимулирующее влияние на рост растений и обеспечило повышение урожайности корней синюхи голубой на 41 и урожайности семян — на 21% [51]. На плантациях зюзника европейского 1-го года выращивания двукратная некорневая подкормка бинарной смесью органо-минерального удобрения Абсолют с рострегулятором Циркон способствовала увеличению высоты растений, повышению количества боковых побегов, что за счет лучшего развития растений обеспечило прибавку урожайности лекарственного сырья на 22–30% [52]. Некорневая обработка вегетирующих растений арники Цирконом (30 мл/га) способствовала лучшему развитию культуры, прибавка урожайности соцветий составила 12–18, семян — 9–18%, но наиболее результативным оказался вариант совместного применения Циркона и микроудобрения Феровит, которые обеспечили прибавку урожая семян 0.08–0.09 т/га (на 32–36%), урожая сухих соцветий — на 0.29–0.32 т/га (на 22–30%) [53]. Двукратная обработка вегетирующих растений амми большой и змееголовника молдавского баковой смесью Циркона с микроудобрением Феровит обеспечивало дружное созревание и получение стабильного урожая семян высоких посевных кондиций: прибавка урожайности по отношению к контролю составила 26 и 44% соответственно. Использование бинарной смеси данных препаратов повышало урожайность надземной массы пажитника сеного и урожайность семян — на 23.8% по сравнению с контролем [54–56].

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ К НЕСТАБИЛЬНЫМ ПОГОДНЫМ УСЛОВИЯМ, ВРЕДИТЕЛЯМ И БОЛЕЗНЯМ

Нестабильные климатические условия требуют разработки приемов повышения адаптационного статуса лекарственных растений для обеспечения их оптимальной продуктивности. Наиболее важной регуляторной системой, обеспечивающей процесс адаптации растений к погодным условиям, является их гормональная система, которая быстро реагирует на меняющиеся стресс-факторы. Согласно литературным данным, фенольные соединения, входящие в состав Циркона, проявляют свойства стрессовых метаболитов и участвуют в адаптации растений к неблагоприятным условиям среды [2]. Установлено, что применение Циркона наиболее эффективно в засушливых условиях, при повышенных температурах и недостатке влаги. В этом случае фенольные соединения (оксикоричные кислоты), являющиеся основой препарата Циркон, активизируют процессы

фотосинтеза и ингибируют дыхание, что позволяет растениям адаптироваться к засушливым погодным условиям [57]. Например, применение Циркона на мяте перечной способствовало увеличению урожайности листа различных сортов: у Лекарственной 4 — на 19, у Медички — на 16, у Москвички — на 12%, на сорте Кубанская 6 действие препарата не проявилось. Однако наибольшая эффективность препарата отмечена в засушливых погодных условиях: прирост урожайности сорта Лекарственная 4 составил 24, сорта Медичка — 23, сорта Москвичка — 25, сорта Кубанская 6 — 12%. Несмотря на то что содержание эфирного масла в сырье изученных сортов не изменялось, за счет повышения урожайности сбор эфирного масла в зависимости от сорта увеличивался при благоприятных погодных условиях на 6–8 л/га, в засушливых — на 11–17 л/га, или на 14–31% по отношению к контрольному варианту [58]. Обработка Цирконом растений календулы лекарственной, пустырника сердечного и змееголовника молдавского в условиях недостаточного количества осадков и высоких температур способствовала повышению урожайности на 51, 36, 32% соответственно, в то время как при оптимальных условиях произрастания — на 32, 21 и 18 [45]. Площадь ассимиляционной поверхности растений календулы и белладонны при засушливых погодных условиях в варианте с биорегулятором, несмотря на отставание растений в росте, превышала контроль на 33–52%, в то время как при оптимальных условиях произрастания этот показатель составлял 25–32%, урожайность сырья повышалась на 23–25 и 36–39% соответственно. При этом повышалось качество лекарственного сырья: содержание каротиноидов в календуле возрастало на 1/3, алкалоидов белладонны — на 34–41% [59]. На зюзнике европейском применение регулятора роста Циркон с микроудобрением Феровит или органо-минеральным удобрением Абсолют в годы с погодными условиями, различающимися по количеству осадков и температурному режиму, показало, что использование данных комплексов позволило повысить устойчивость растений и сократить потери урожая в условиях гидротермального стресса. Усиление ростовых процессов (высоты растений и количества боковых побегов) привело к сокращению потерь урожая лекарственного сырья на 20–22% по сравнению с контролем [60].

Современные технологии возделывания и защиты лекарственных культур от вредителей и болезней предусматривают наряду с использованием препаратов биоцидного действия применение и рострегулирующих препаратов, способствующих

щих повышению экологической безопасности растениеводства. Отмечено, что Циркон обладает полифункциональным действием на иммунологический статус растений, стимулирует возникновение защитных гистогенных реакций пораженной ткани, повышает содержание салициловой кислоты до 2.0–2.5 раза. В работах разных авторов указано на то, что добавление Циркона в системы защиты лекарственных культур оказывало положительное влияние на их рост и развитие, стимулировало защитные свойства, способствовало улучшению фитосанитарного состояния посевов, повышению урожайности сырья, улучшению его качества и снижению пестицидной нагрузки [34, 61, 62].

Совместное применение инсектоакарицидов и Циркона на розах в период вегетации позволило снижать до 2-х и более раз норму основного препарата без снижения биологической эффективности обработок. Использование баковых смесей Актары, Фитоверма, Неорона и Циркона обеспечило сохранение токсичности при уменьшении концентрации препаратов в 2–5 раз [37]. Копеечнику альпийскому первого года большой вред наносят клубеньковые долгоносики, при высокой степени поврежденности вредителем изреженность посевов может достигать до 50%. Обработка семян Цирконом с последующим опрыскиванием баковой смесью инсектицида Каратэ в сниженной норме расхода с рострегулятором и повторной обработкой Цирконом позволила добиться высокой биологической эффективности (92%), сопоставимой с эталонным вариантом (полной нормой расхода инсектицида). При этом, проведенные исследования показали, что под влиянием Циркона растения активно наращивали биомассу, увеличение которой составляло от 30 до 52, а прибавка урожая составила 19–21% [34, 63]. Отрастающая энотера 2-го года вегетации повреждается блошками, но применение химических инсектицидов на ее плантациях нежелательно. Испытания баковой смеси биологического инсектицида Фитоверм (0.3 л/га) с Цирконом (40 мл/га) показали ее высокую биологическую эффективность — 82.9% (численность блошек снизилась до экономически незначимого порога вредоносности), при этом урожайность в варианте с применением одного Фитоверма была на 18–19% меньше [64].

Включение Циркона в комплексную систему защиты наперстянки шерстистой от болезней и сорняков (предпосевная обработка семян (0.1 мл/кг) и опрыскивание баковой смесью гербицида Зеллек-супер, КЭ с фунгицидом Топаз, КЭ + Циркон (1 л/га + 0.2 л/га + 35 мл/га)) приводило к

усилению роста растений, засоренность посевов снижалась на 89.8%, а развитие септориоза не превышало 6.3%. При этом урожайность лекарственного сырья по сравнению с эталоном повышалась на 18, содержание ланатозида — на 15.4%, а первые признаки поражения растений септориозом появлялись на 7–10 сут позже, что позволило провести уборку в более ранние сроки при высоком содержании ланатозида в сырье [65].

При использовании комплексной технологии защиты лапчатки белой от ржавчины, включавшей применение бордоской смеси с регулятором роста Циркон и микроудобрением Феровит, развитие заболевания не превышало уровень экономического порога вредоносности, а повышение массы корней составляло 28–31% [66].

Наблюдения за культурой шиповника показали, что при последовательной обработке биорегуляторами Эпин-экстра и Циркон пораженность растений пятнистостями была слабой, в то время как в контрольном варианте листья были поражены в средней степени при 100%-ном распространении заболевания. При этом в засушливых погодных условиях данные препараты компенсировали потери урожайности на 36–57% [47].

Использование Циркона позволило в отдельных случаях полностью избежать ситуаций, при которых применение пестицидов на лекарственных культурах становится необходимым. Для ряда лекарственных культур, таких как мята перечная, шалфей лекарственный, серпуха венценосная, значительную опасность представляют мучнистые росы, снижение урожайности данных культур достигает в зависимости от степени развития заболевания от 10 до 65%. В то же время применение рострегуляторов и микроудобрений обеспечивает более ранние сроки их уборки на сырье.

На мяте перечной и шалфее лекарственном двукратная обработка рострегулятором Циркон вегетирующих растений оказывала стимулирующее действие на ростовые процессы, способствовала ускорению прохождения фаз — цветения наступало на 4–6 сут раньше, чем в контроле, что позволило приступить к уборке сырья до поражения растений мучнистой росой. Кроме того, урожайность листа повышалась на 15–20%, а сбор эфирного масла с гектара — на 24–28%. Аналогичное действие оказало комплексное применение препарата Циркон с микроудобрением Феровит на серпухе венценосной: интенсивный рост и развитие растений позволили провести уборку на сырье раньше, в опытном варианте не отмечали поражение растений мучнистой росой.

При этом повышались урожайность сырья серпухи на 16–20% и содержание в нем биологически активных веществ (фитоэкдистероидов) на 6–8% [64, 67].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, многолетние исследования, проведенные на различных видах лекарственных растений, показали высокую эффективность применения на них гидроксикоричных кислот: использование препаратов на их основе повышало эффективность сельскохозяйственного производства и являлось важной компонентой в экологически приемлемых технологиях возделывания лекарственных культур. Полученные рядом авторов экспериментальные данные показали, что гидроксикоричные кислоты обладают широким спектром действия на всех этапах развития растительного организма, способствуют усилению роста и развития растений, увеличению урожайности и улучшению качества полученного лекарственного сырья, повышают адаптационный статус лекарственных культур при негативном воздействии погодных условий, вредителей и болезней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прусакова Л.Д., Кефели В.И., Белопухов С.Л., Вакуленко В.В., Кузнецова С.А. Роль фенольных соединений в растениях // Агрохимия. 2008. № 7. С. 86–96.
2. Шаповал О.А., Вакуленко В.В., Можарова И.П. Как повысить устойчивость растений к засухе // Защита и карантин раст. 2011. № 3. С. 61–62.
3. Hesham R. El-Seedi, Asmaa M.A. El-Said, Shaden A.M. Khalifa, Ulf Göransson, Bohlin L., Borg-Karlson A.-K., Verpoorte R. Biosynthesis, natural sources, dietary intake, pharmacokinetic properties, and biological activities of hydroxycinnamic acids // J. Agricult. Food Chem. 2012 № 60(44). P. 10877–10895. <https://doi.org/10.1021/jf301807g>
4. Самородов В.Н., Поспелов С.В., Моисеева Г.Ф., Середина А.В. Фитохимический состав представителей рода эхинацея (*Echinacea* Moench) и его фармакологические свойства (обзор) // Хим. фарм. журн. 1996. Т. 30. № 4. С. 32–37.
5. Wills F., Stuart T. Alkylamide and cichoric acid level in *Echinacea purpurea* grown in Australia // Food Chem. 1999. V. 67. P. 385–388.
6. Баширова Р.М., Никитина Т.И., Шайдуллина Г.Г. Особенности химического состава растений *Echinacea purpurea* (L.) Moench, интродуцированной в республике Башкортостан // Раст. ресурсы. 2000. Т. 36. № 2. С. 105–109.
7. Robinson W., Reinicke M., Abdel-Malek S., Chow S. Inhibitor of HIV-1. Replication that inhibit HIV integrase // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1996. № 93. P. 6326–6331.
8. Aboueillella A.M., Shahein Y.E., Tawfik S.S., Zahran A.M. Phytotherapeutic effects of *Echinacea purpurea* in gamma-irradiated mice // Vet. Sci. 2007. № 8(4). P. 341–351.
9. Joks G., Petrovic S., Joksic I., Leskovac A. Biological effects of *Echinacea purpurea* on human blood cells // Arh. Hig. Rada Toksikol. 2009. V. 60. P. 165–172.
10. Murthy H.N., Kim Y.S., Park S.Y., Paek K.Y. Biotechnological production of caffeic acid derivatives from cell and organ cultures of *Echinacea* species // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2014. № 98(18) P. 7707–7717.
11. Малеванная Н.Н. Циркон – иммуномодулятор нового типа // Циркон – природный регулятор роста. Применение в сельском хозяйстве. М.: “НЭСТ М”, 2010. С. 3–8.
12. Макеева И.Ю. Физиолого-биохимические ответы *Solanum tuberosum* на действие кофейной кислоты: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2017. 23 с.
13. Пушкина Г.П., Бушковская Л.М., Тхаганов Р.Р., Сидельников Н.И. Влияние Циркона на урожайность и качество лекарственного растительного сырья // Циркон – природный регулятор роста. Применение в сельском хозяйстве. М., 2010. С. 151–162.
14. Бобришова И.Ю., Зимица Т.В. Биопрепараты на основе растительных биологически активных веществ // Защита и карантин раст. 2016. № 8. С. 30–32.
15. Сидельников Н.И., Ковалев Н.И., Хазиева Ф.М. Роль регуляторов роста и микроудобрений при введении лекарственных растений в культуру // Вестн. рос. сел.-хоз. науки. 2018. № 3. С. 62–66.
16. Шаповал О.А., Можарова И.П. Регуляторы роста растений в сельском хозяйстве // Защита и карантин раст. 2019. № 4. С. 9–14.
17. Дурмишидзе С.В. Биохимия растений и охрана окружающей среды // Plant Biochem. Environ. Protect. Тбилиси, 1984. 44 с.
18. Blum U., Staman L.R., Flint J.L., Shafer R.S. Induction and/or selection of phenolic acid-utilizing bulk-soil and rhizosphere bacteria and their influence on phenolic acid phytotoxicity // J. Chem. Ecol. 2000. № 26. P. 2059–2078.
19. Алексеева К.Л., Малеванная Н.Н. Механизм полифункционального действия препарата Циркон // Индуцированный иммунитет сельскохозяйственных культур – важное направление в защите растений / Под ред. С.С. Санина, В.А. Павлюшина. СПб.: ВНИИФ, 2006. С. 69–70.
20. Бушковская Л.М., Пушкина Г.П., Вакулин К.Н. Перспективы использования биорегулятора Циркон в системе защиты лекарственных культур от вредных организмов // Интродукция нетрадиционных и редких растений. Мичуринск, 2008. Т. III. С. 102–105.
21. Талиева М.Н., Павленко Е.П., Рункова Л.В. Влияние Циркона на устойчивость моркови к поражению корнеплодов болезнями // Циркон – природный регулятор роста. Применение в сельском хозяйстве. М., 2010. С. 216–220.

22. Чурикова В.В., Малеванная Н.Н. К вопросу о механизме защитного действия Циркона // Применение препарата Циркон в производстве сельскохозяйственной продукции. М., 2004. С. 3–4.
23. Прусакова Л.Д., Малеванная Н.Н., Белопухов С.Л., Вакуленко В.В. Регуляторы роста растений с антистрессовыми и иммунопротекторными свойствами // Агрохимия. 2005. № 11. С. 76–86.
24. Вакуленко В.В. Влияние регуляторов роста на урожайность сельскохозяйственных культур в различных зонах России // Зерн. хоз-во России. 2015. № 1. С. 24–26.
25. Исайчев В.А., Андреев Н.Н., Каспировский А.В. Влияние регуляторов роста на содержание тяжелых металлов в зерне яровой пшеницы сорта Землячка в условиях среднего Поволжья // Вестн. Казан. ГАУ. 2013. Т. 8. № 1(27). С. 103–107.
26. Прудников П.С., Прудникова Е.Г. Протекторный эффект гидроксикоричных кислот в условиях интоксикации растений *Fragaria ananassa* Duch свинцом // Вестн. Орел. ГАУ. 2016. № 2(59). <https://doi.org/10.15217/issn1990-3618.2016.2.96>
27. Серегина И.И., Белопухов С.Л. Защитно-стимулирующая роль микроэлементов и регуляторов роста в растениеводстве. М.: Проспект, 2021. 184 с.
28. Турецкая Р.Х., Гуськов А.В. Роль ауксинов, их кофакторов и ингибиторов в ризогенезе // Метаболизм и механизм действия фитогормонов: тр. Всесоюз. конф. Иркутск, 1979. С. 21–27.
29. Шаин С.С. Биорегуляция продуктивности растений. Красногорск: Оверлей, 2005. 228 с.
30. Сергеев А.Ю., Климахин Г.И., Пушкина Г.П. Исследование способов повышения энергии прорастания и всхожести семян серпухи венценосной (*Serratula coronata* L.) // Лекарств. растениеводство. М.: ВИЛАР, 2006. С. 179–182.
31. Пушкина Г.П., Шаин С.С., Малеванная Н.Н. Комплексное использование регулятора роста циркон и фитогормона гиббереллин на лекарственных культурах // Циркон – природный регулятор роста. Применение в сельском хозяйстве М.: Нэст М, 2010. С. 172–181.
32. Сидельников Н.И., Пушкина Г.П., Бушковская Л.М. Эффективность совместного применения фитогормонов и биорегуляторов на белладонне // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2013. № 11. С. 31–34.
33. Вакулин К.Н. Мобилизация биологически адаптивного потенциала некоторых лекарственных культур при комплексном применении регуляторов роста и пестицидов: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 146 с.
34. Бушковская Л.М., Пушкина Г.П., Сидельников Н.И., Быкова В.А. Перспективы использования регуляторов роста в системе защиты лекарственных культур от вредителей и болезней // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2012. № 1. С. 45–52.
35. Курносое В.Н., Бушковская Л.М., Пушкина Г.П., Загуменников В.Б. Применение биопрепаратов и почвенно-грунтовых смесей при выращивании женьшеня // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. М.: РУДН, 2005. Т. 3. С. 357–359.
36. Пушкина Г.П., Бушковская Л.М. Эффективность регуляторов роста на лекарственных культурах // АГРО XXI. 2011. № 4–6. С. 27–29.
37. Медведев И.А. Оптимизация способов размножения и защиты роз от вредителей в условиях Москвы и Московской области: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Мичуринск, 2006. 22 с.
38. Морозов В.И., Антипов В.И., Быкова О.А., Ларина Л.А. Использование регуляторов роста при размножении кустарниковых и травянистых лекарственных культур // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. М., 2009. Т. II. С. 221–224.
39. Хазиева Ф.М., Пушкина Г.П. Влияние регуляторов роста на укоренение черенков белладонны // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования: Мат-лы VIII Международ. симп. М., 2009. Т. II. С. 221–224.
40. Басалаева И.В. Оценка и создание исходного материала для селекции белладонны (*Atropa belladonna* L.) в Нечерноземной зоне РФ: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2013. 24 с.
41. Пушкина Г.П., Бушковская Л.М., Тхаганов Р.Р., Сидельников А.Н. Применение универсального регулятора роста ДваУ при вегетативном размножении лекарственных культур // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2015. № 5. С. 26–30.
42. Jamwal K., Bhattacharya S., Puri S. Plant growth regulator mediated consequences of secondary metabolites in medicinal plants // J. App. Res. Med. Aromat. Plants. 2018. V. 9. P. 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.12.003>
43. Пушкина Г.П., Шаин С.С., Антипов В.И., Быкова О.А. Пути повышения продуктивности змееголовника молдавского // АГРО XXI. 2008. № 7–9. С. 44.
44. Курносое В.В., Бушковская Л.М. Повышение ростовых процессов и устойчивости женьшеня к болезням при применении циркона типа // Природный регулятор роста Циркон. Применение в сельском хозяйстве. М.: НЭСТ М, 2010. 384 с.
45. Пушкина Г.П., Маланкина Е.Л., Тхаганов Р.Р., Морозов А.И. Эффективность применения регуляторов роста и микроудобрений на эфирномасличных культурах // Достиж. науки и техн. АПК. 2010. № 7. С. 17–19.
46. Ромашкина С.И., Хазиева Ф.М. Перспективы выращивания *Hedysarum alpinum* L. в Нечерноземной зоне Российской Федерации // Вестн. КрасГАУ. 2020. № 12(165). С. 63–68.
47. Мельникова Г.В., Куштель Д.А., Сетин В.Н. Использование регуляторов роста и микроудобрений в технологиях выращивания шиповника // Биологические особенности лекарственных и ароматических растений и их роль в медицине. М.: ВИЛАР, 2016. С. 126–128.
48. Савченко О.М. Влияние регуляторов роста на основные хозяйственно-ценные признаки и содержание стероидных сапонинов в семенах *Trigonella foeniculum-graecum* L. // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2017. Т. 20. № 7. С. 31–34.

49. Ковалев Н.И., Маланкина Е.Л. Эффективность комплексного применения органо-минерального удобрения ЭкоФус с биорегулятором Циркон на шалфее лекарственном (*Salvia officinalis* L.) // Овощи России. 2019. № 6. С. 76–79.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-76-79>
50. Ковалев Н.И., Пушкина Г.П. Влияние микроудобрений и регулятора роста на продуктивность лопуха большого (*Arctium lappa* L.) и шалфея лекарственного (*Salvia officinalis* L.) // Овощи России. 2020. № 4. С. 79–83.
51. Глазунова А.В. Влияние регулятора роста Циркон и микроудобрения Силиплант на растения синюхи голубой // Молодые ученые и фармация XXI века. М.: ВИЛАР, 2018. С. 36–39.
52. Сидельников Н.И., Ковалев Н.И. Агротехнические приемы возделывания зюзника европейского (*Lycopus europaeus* L.) в условиях центральной Нечерноземной зоны России // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2017. Т. 20. № 7. С. 13–19.
53. Грязнов М.Ю., Тоцкая С.А. Приемы выращивания *Apnica foliosa* Nutt. при возделывании в центральном регионе РФ // Научный и инновационный потенциал развития производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений. 2019. С. 170–175.
54. Тоцкая С.А. Влияние стимуляторов роста на урожайность и качество семян *Ammi majus* // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. Мат.-лы VIII Междунар. симп. М., 2009. С. 270–273.
55. Тоцкая С.А., Станишевская И.Е., Хазиева Ф.М., Сидельников Н.И. Приемы повышения урожайности и качества семян змееголовника молдавского (*Dracosephalum moldavica* L.) // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2012. № 7. С. 47–50.
56. Савченко О.М., Хазиева Ф.М. Урожайность пажитника сеного в зависимости от обработок ростстимулирующими препаратами и ретардантом // Вестник КрасГАУ. 2020. № 8(161). С. 3–8.
57. Ильина Л.В. Влияние Циркона на урожайность и качество продукции зерновых культур // Применение препарата Циркон в производстве сельскохозяйственной продукции. М., 2004. С. 35–36.
58. Морозов А.И. Влияние регулятора роста Циркон на адаптивность сортов мяты перечной к нестабильным погодным условиям нечерноземной зоны России // Плодоводство и ягодоводство России. 2011. Т. 28. № 2. С. 83–89.
59. Пушкина Г.П., Бушковская Л.М., Сидельников Н.И., Морозов А.И., Тхаганов Р.Р., Мельникова Г.В. Адаптация лекарственных культур к абиотическим и биотическим стрессам // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2012. № 7. С. 14–17.
60. Пушкина Г.П., Бушковская Л.М., Ковалев Н.И. Экзогенное регулирование адаптивности зюзника европейского (*Lycopus europaeus* L.) к засушливым погодным условиям // Новые и нетрадиц. раст. и перспективы их использования. 2017. № S12. С. 239–241.
61. Малеванная Н.Н. Ростстимулирующая и иммуномодулирующая активности природного комплекса гидроксикоричных кислот (препарат Циркон) // Регуляция роста, развития и продуктивности растений. Минск: Право и экономика, 2005. С. 289.
62. Чурикова В.В., Нечаева М.Ю., Малеванная Н.Н. Защитно-стимулирующие свойства препарата Циркон // Там же. С. 247.
63. Вакулин К.Н. Рострегулятор Циркон на копеечнике альпийском // Защита и карантин раст. 2006. № 11. С. 28.
64. Бушковская Л.М., Пушкина Г.П., Морозов А.И. Регуляторы роста растений в технологиях защиты лекарственных культур // Защита и карантин раст. 2011. № 9. С. 31–32.
65. Пушкина Г.П., Бушковская Л.М., Сидельников Н.И. Применение Циркона в технологии защиты наперстянки шерстистой // Защита и карантин раст. 2017. № 9. С. 47–49.
66. Масляков В.Ю., Мурадасилова Н.В., Зайко Л.Н., Бушковская Л.М., Пушкина Г.П., Журба О.В., Сидельников Н.И., Фадеев Н.Б. Лапчатка белая (*Potentilla alba* L.): фитопатогены в природе и в условиях выращивания // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2013. № 11. С. 35–39.
67. Бушковская Л.М., Пушкина Г.П. Роль препаратов небактериальной природы в регулировании вредоносности мучнистой росы на лекарственных культурах // Современные проблемы иммунитета растений к вредным организмам. СПб.: ВИЗР, 2016. С. 87.

Applying of Hydroxycinnamic Acids on Medicinal Crops

N. I. Kovalev

All-Russian Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants
ul. Grina 7, Moscow 117216, Russia
E-mail: kovalevteam@mail.ru

The review discusses the use of growth regulators based on hydroxycinnamic acids in medicinal plant production. Long-term studies have shown that hydroxycinnamic acids have a multifunctional effect on the plant organism: they contribute to the activation of physiological processes in plants, enhance their growth and development. In addition, growth regulators based on them increase the adaptive properties of cultivated plants to adverse environmental factors of both abiotic (weather conditions) and biotic nature (pests and phytopathogens). The inclusion of growth regulators based on hydroxycinnamic acids is an important component of environmentally safe and at the same time highly effective technologies for the cultivation of medicinal crops.

Key words: growth regulators, medicinal plants, phenolic compounds, hydroxycinnamic acids.