СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Проблема азота при использовании чернозема выщелоченного по интенсивной технологии в лесостепи Западной Сибири

И. Н. Шарков, С. А. Колбин, Л. М. Самохвалова 3

Формы фосфора в эродированных лугово-черноземных почвах Западной Сибири и их роль в минеральном питании растений

В. М. Назарюк, Ф. Р. Калимуллина 11

Баланс азота, использование биогенных элементов в агроценозах с бессменным возделыванием костреца безостого при длительном применении различных доз бесподстилочного навоза

С. И. Тарасов, М. Е. Кравченко, Т. А. Бужина 21

Удобрения

Сравнительная эффективность систем удобрения

Р. А. Афанасьев, Г. Е. Мерзлая 31

Изменение физико-химических свойств чернозема выщелоченного и урожайности сахарной свеклы при длительном применении удобрений в ЦЧР

О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина 37

Выращивание салата листового на смесях цеолитного субстрата с бесплодными и питательными грунтами

В. С. Солдатов, А. П. Езубец, О. В. Ионова, С. Ю. Косандрович 47

Регуляторы роста растений

Влияние 24-эпибрассинолида на рост, содержание фотосинтетических пигментов, холодоустойчивость и антиоксидантную активность растений томата

А. Н. Дерябин, Т. А. Суворова, С. В. Сычева, С. Н. Деревщюков 55

Пестициды

Имидаклоприд и технологии его применения для защиты семенных посадок картофеля от тлей

О. В. Долженко, Т. В. Долженко 65

Агроэкология

Агроэкологическое обоснование использования микробиологических препаратов в качестве деструкторов соломы озимой пшеницы в условиях черноземных почв Курской области

В. И. Лазарев, Ж. Н. Минченко, А. А. Русакова 71

Дифференциация сортов ячменя по устойчивости к кадмию сохраняется на протяжении всего жизненного цикла растений

С. А. Гераськин, А. В. Дикарев, М. А. Лыченкова 78

Использование продуктов биоконверсии отходов деревообработки в качестве биоудобрений для ремедиации деградированных почв

А. В. Богородская, О. В. Киселёва 86

Правила для авторов 94

Contents

No. 2, 2021

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

Problem of Nitrogen When Using Leached Cherozem on Intensive Technology in Forest-Steppe of Western Siberia
I. N. Sharkov, S. A. Kolbin, L. M. Samokhvalova 3

Phosphorus Forms in Eroded Meadow-Chernozem Soils of Western Siberia and Their Role in the Mineral Nutrition of Plants
V. M. Nazaryuk, F. R. Kalimullina 11

Effect of Prolonged Application of Different Doses of Liquid Manure on Nitrogen Balance, the Use of Nutrients in Agricultural Lands with Permanent Cultivation of Awnless Brome (*Bromopsis inermis* Leyss.)
S. I. Tarasov, M. E. Kravchenko, T. A. Buzhina 31

Fertilizers

Comparative Efficiency of Fertilizer Systems
R. A. Afanas'ev, G. E. Merzlaya 31

Change of Physical and Chemical Properties of Leached Chernozem and Productivity of Grain-Beet Crop Rotation under Long-Term Application of Fertilizers in the Central Black-Earth Region
O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, T. N. Podvigina 37

Cultivation of Leaf Lettuce *Lactuca sativa* L. on Mixtures of Zeolite Substrate with Bare and Fertilized Grounds
V. S. Soldatov, A. P. Ezubets, O. V. Ionova, S. U. Kosandrovich 47

Plant Growth Regulators

Influence of 24-Epibrassinolide on Growth, Content of Photosynthetic Pigments, Cold Resistance and Antioxidant Activity of Tomato Plants
A. N. Deryabin, T. A. Suvorova, S. V. Sycheva, S. N. Derevshchyukov 55

Pesticides

Imidacloprid and Technologies of Its Application for Potato Seed Plantings Protection against Aphids
O. V. Dolzhenko, T. V. Dolzhenko 65

Agroecology

Agroecological Justification of the Use of Microbiological Preparations as Destructors of Winter Wheat Straw in the Conditions of Black Earth Soils of the Kursk Region
V. I. Lazarev, Zh. N. Minchenko, A. A. Rusakova 71

Ecotoxicology

Differentiation of Barley Varieties in Resistance to Cadmium is Remain the Same during the Whole Life Cycle of Plants
S. A. Geras'kin, A. V. Dikarev, M. A. Lychenkova 78

Use of Wood Waste Bioconversion Products as Biofertilizers for Remediation of Degraded Soils
A. V. Bogorodskaya, O. V. Kiseleva 86

Rules for authors 94

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 3–10

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ
Плодородие почв

УДК 631.811:631.416.1:631.445.4(571.1)

ПРОБЛЕМА АЗОТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПО ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2021 г. И. Н. Шарков[1,*], С. А. Колбин[1], Л. М. Самохвалова[1]

[1] Сибирский научно-исследовательский институт земледелия и химизации сельского хозяйства СФНЦА РАН 630501, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, а/я 463, Россия

*****E-mail: humus3@yandex.ru*

Поступила в редакцию 23.05.2020 г.
После доработки 07.06.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

Зерновые культуры выращивали в многолетнем (12 лет) полевом опыте, заложенном на черноземе выщелоченном в центральной лесостепи Новосибирского Приобья. Опыт представлял собой двупольный севооборот пшеница – ячмень с ежегодным применением под культуры возрастающих доз азота (N0, N30, N60, N90) и комплекса средств защиты растений от вредных организмов. Цель исследования заключалась в оценке ситуации с минеральным азотом в системе почва–растение при получении с помощью интенсивной технологии максимальной урожайности зерновых культур. При достаточном применении удобрений и средств защиты растений уровень урожайности определялся в основном текущими гидротермическими условиями территории. Наибольшая, достаточно высокая для Сибири среднегодовая урожайность зерна получена в варианте N90 – 3.27 т/га, причем в самые засушливые годы она снижалась до 0.74, в умеренно увлажненные – повышалась до 3.99 т/га. Наиболее дефицитный среднегодовой баланс азота в почве (–40 кг/га) складывался в вариантах без применения азотного удобрения. Под влиянием азотного удобрения баланс азота становился более благоприятным и в варианте N90 был близким к бездефицитному. Несмотря на это, в конце опыта значительная часть азота в этом варианте – ≈350 кг/га (32% от внесенного в почву за период опыта) – была обнаружена в форме нитратов в слое почвы 0–200 см. Обсуждены агрометеорологические особенности выращивания яровых зерновых культур в сибирском регионе, способствующие миграции нитратов вглубь почвенного профиля. Сделан вывод, что стремление к получению на сибирских черноземах максимальной урожайности культур с помощью интенсивных технологий должно обосновываться не только с позиции экономической эффективности, но и экологической безопасности.

Ключевые слова: азотное удобрение, баланс азота в почве, миграция нитратов в почве, зерновые культуры, интенсивная технология.

DOI: 10.31857/S0002188121020101

ВВЕДЕНИЕ

Основные массивы пашни в Западной Сибири располагаются в лесостепной зоне и представлены потенциально плодородными черноземными почвами. Их доля на большей части пашни западно-сибирского региона – в Алтайском крае, Омской, Кемеровской и Новосибирской обл. составляет ≈70% [1]. Экстенсивное использование черноземных почв на протяжении многих десятилетий в зернопаровых севооборотах при минимальном применении минеральных и органических удобрений явилось причиной значительного снижения их плодородия. В результате так называемой выпаханности почв – резкого уменьшения содержания в них легкоминерализуемого органического вещества – произошло существенное снижение их азотминерализующей способности и, как следствие, ухудшение обеспеченности культур азотом.

В настоящее время в регионе продолжают преобладать экстенсивные технологии возделывания культур, ориентированные на дальнейшее использование естественного почвенного плодородия, о чем свидетельствует низкая урожайность (≈1.5 т зерна/га) возделываемых здесь яровых зерновых культур – пшеницы, ячменя и овса [1, 2]. Между тем результаты полевых опытов, проведенных научно-исследовательскими учреждениями в богарных условиях, свидетельствуют о возможности получения в лесостепи Западной Си-

бири урожаев зерна 3–4 т/га, если на черноземах применяют интенсивные технологии возделывания культур [3–5]. Данные технологии рассчитаны на получение максимальной урожайности благодаря применению удобрений и других средств управления продукционным процессом растений – пестицидов, ретардантов и различных регуляторов роста растений.

Примерно 3-кратное различие в урожайности между научными опытами и практикой свидетельствует о явном несоответствии получаемых большинством хозяйств урожаев уровню климатических (гидротермических) ресурсов региона. Причины медленного освоения хозяйствами Сибири интенсивных технологий неоднократно обсуждали [6, 7]. Основная из них заключается в разбалансированности (не в пользу земледельцев) системы цен – продажи хозяйствами зерна и покупки ими удобрений и других средств химизации. В результате интенсификация технологий, обеспечивая прирост урожайности культур, не гарантирует хозяйствам получения устойчивой прибыли. Заметим, что в настоящее время экономические условия для применения интенсивных технологий в Сибири значительно хуже, чем в Англии во второй половине прошлого века, в эпоху широкого освоения таких технологий. Например, при текущей цене 1 кг азота в удобрениях примерно 55 руб. и средней цене зерна ≈8 руб./кг, чтобы приобрести 1 кг азота, хозяйству в Сибири требуется продать примерно 7 кг зерна. По свидетельству Дж. Кука [8], в 70-е годы прошлого века английский фермер, чтобы купить 1 кг азота, должен был продать только 3 кг зерна. При этом следует иметь в виду, что в Сибири гидротермические условия, во многом определяющие рост урожайности культур и окупаемость удобрений дополнительным урожаем, значительно более неблагоприятные, чем в Англии.

Тем не менее, со временем, благодаря повышению спроса на зерно (главным образом вследствие восстановления животноводства и увеличения экспорта), освоение хозяйствами региона интенсивных технологий будет ускоряться. Необходимым условием для этого, учитывая отмеченную выше выпаханность почв, станет применение повышенных и высоких доз минеральных, прежде всего азотных, удобрений. Но применение таких доз в часто засушливых условиях Сибири чревато значительным недоиспользованием растениями минерального азота и, как следствие, накоплением его в почвенном профиле.

Проблему не удается решить за счет дробного (в соответствии с погодой) применения азотных удобрений. Дело в том, что выращиваемые в Сибири яровые зерновые культуры характеризуются достаточно коротким (<3-х мес.) вегетационным периодом. Формирование и развитие элементов продуктивности у этих культур жестко детерминировано во времени и приурочено в основном к июню–июлю. Показано [9, 10], что использование азотных подкормок в течение вегетации не способствует росту урожайности зерна в сравнении с единовременным применением полной дозы азота. Поэтому, несмотря на отсутствие точного прогноза погоды для этих 2-х месяцев, удобрения приходится вносить в почву в полной дозе в мае, до посева культур.

Образующееся в почве повышенное количество нитратного азота, особенно в годы с характерными для Сибири июньско-июльскими засухами, в дальнейшем, при обильных осадках осенью или снеготаянии весной, может мигрировать вглубь почвенного профиля, становясь относительно малодоступным зерновым культурам. Основанием для такого предположения служат результаты ранее проведенных в Сибири исследований на базе длительных полевых опытов. Было показано [11], что при систематическом создании в черноземах избытка минерального азота (за счет применения повышенных доз азотных удобрений или парования почвы), спустя годы, за пределами 1-метрового слоя почвы обнаруживаются большие количества нитратного азота (до 300 кг N/га и более).

Цель работы – анализ ситуации с минеральным азотом в системе почва–растение–удобрение при использовании чернозема выщелоченного в многолетнем полевом опыте при применении интенсивной технологии, ориентированной на получение максимальной урожайности зерновых культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт в виде севооборота пшеница – ячмень был заложен в 2004 г. (освоен – в 2006 г.) в центральной лесостепи Новосибирского Приобья. Территория характеризуется преобладанием в структуре почвенного покрова черноземов выщелоченных и оподзоленных средне- и тяжелосуглинистого гранулометрического состава с содержанием гумуса 5.5–6.5%. Почвы имеют близкую к нейтральной реакцию среды, обычно средне обеспечены подвижными соединениями фосфора и повышено- или высоко-обменного калия.

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднемощный среднегумусный среднесуглинистый. Исходное состояние слоя 0–25 см характеризовалось следующими показателями:

$C_{орг}$ – 3.7%, $C_{подв}$ – 3860 мг/кг, $C_{мортмассы}$ – 690 мг/кг, $N_{общ}$ – 0.30%, P_2O_5 и K_2O (по Чирикову) – 23 и 18 мг/100 г почвы соответственно, обменные Ca и Mg – 28.8 и 4.0 смоль(экв)/кг почвы соответственно, pH_{H_2O} 7.2.

Климат сибирской лесостепи – резко континентальный, с продолжительной и холодной зимой, коротким и относительно теплым летом. В сравнении с соответствующей широтой Восточно-Европейской равнины укороченность вегетационного периода в Западной Сибири достигает 20–30 сут при меньшей на 200–300°C сумме биологически активных температур [12]. Среднегодовое количество осадков в районе проведения исследования составляет ≈400 мм, сумма температур воздуха >10°C – ≈1800°C при продолжительности периода 120 сут. Метеоусловия в годы исследования (2006–2017 гг.) были различными. Наиболее адекватная оценка их влияния на урожайность пшеницы в Западной Сибири, как было показано в [13], может быть сделана по гидротермическому коэффициенту (**ГТК**) Селянинова [14] за июнь–июль, среднемноголетний показатель которого для района исследования составляет 1.05. За 12 лет проведения опыта величина этого показателя изменялась от 0.18 до 1.67 (среднее – 1.01), в том числе 50% лет были умеренно увлажненными (ГТК > 1), 42% – умеренно засушливыми (ГТК 0.5–1.0) и 8% – острозасушливыми (ГТК < 0.5).

Полевой опыт представлял собой двупольный севооборот пшеница–ячмень, в котором под каждую культуру ежегодно вносили вразброс под предпосевную культивацию азот в виде $N_{аа}$ в дозах 0, 30, 60 и 90 кг N/га. Яровую пшеницу сорта Новосибирская 29 (с 2014 г. – Новосибирская 31) и ячмень сорта Ача во всех вариантах применения удобрений выращивали с применением одного и того же комплекса средств химизации, защищавшего растения от сорняков, болезней, вредителей и полегания. Размеры делянок 4.5 × 13 (м), повторность четырехкратная. Урожайность зерна учитывали сноповым методом с последующей уборкой оставшихся растений комбайном с измельчением и разбрасыванием соломы по полю. Ежегодно в сентябре почву обрабатывали плугом на глубину 25–27 см.

Весной в слое 0–100 см почвы, в варианте N0 определяли запасы продуктивной влаги и нитратного азота. В конце опыта (май 2018 г.) запасы нитратов определяли в слое 0–200 см не только в варианте N0, но и N90. Последний вариант был выбран потому, что в нем была получена максимальная среднегодовая урожайность зерновых. Почвенные образцы на соответствующих делянках отбирали с помощью бура в трехкратной повторности. Общую влагу определяли высушиванием проб при 105°C, содержание нитратного азота – усовершенствованным дисульфофеноловым методом [15]. В растительных образцах – зерне и соломе – определяли общее содержание азота по методу Кьельдаля и с учетом их массы рассчитывали отчуждение элемента с поля. Для характеристики исходного состояния почвы в почвенных образцах определяли содержание общего углерода и углерода фракций легкоминерализуемого органического вещества в виде лабильного (подвижного) гумуса, детрита и мортмассы. Методики их определения описаны ранее [16, 17]. Статистическая обработка результатов исследования выполнена с помощью пакета прикладных программ “SNEDECOR” [18].

Таблица 1. Запасы продуктивной влаги и нитратного азота в почве в вариантах опыта без применения азотного удобрения (2006–2017 гг.)

Слой почвы, см	Влага, мм		$N\text{-}NO_3$, кг/га	
	среднее	lim	среднее	lim
0–40	67	49–88	30	16–46
0–100	153	114–190	52	22–93

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные, полученные в варианте опыта без применения азотного удобрения, свидетельствовали о том, что урожаи пшеницы и ячменя формировались при достаточно высоком стартовом (весеннем) запасе продуктивной влаги в почве и низком – нитратного азота (табл. 1). Согласно шкале обеспеченности зерновых нитратным азотом [9], высокий эффект от применения азотного удобрения на лесостепных черноземах проявляется при содержании весной в слое 0–40 см почвы <10 мг $N\text{-}NO_3$/кг почвы (50 кг N/га). При запасе $N\text{-}NO_3$ в этом слое >75 кг/га прибавки урожая зерна от азотного удобрения чаще всего отсутствуют. С этой точки зрения в нашем опыте при достаточно малом среднегодовом запасе $N\text{-}NO_3$ (30 кг/га) следовало ожидать высокого эффекта от применения азотного удобрения.

Это ожидание подтвердилось, о чем свидетельствовали результаты прироста урожайности зерна пшеницы и ячменя от применения азотного удобрения (рис. 1). Наибольший прирост среднегодовой урожайности отмечен от дозы N30: по отношению к варианту N0 у пшеницы он составил 26, ячменя – 40%. Под влиянием доз N60 и N90 происходило дальнейшее увеличение уро-

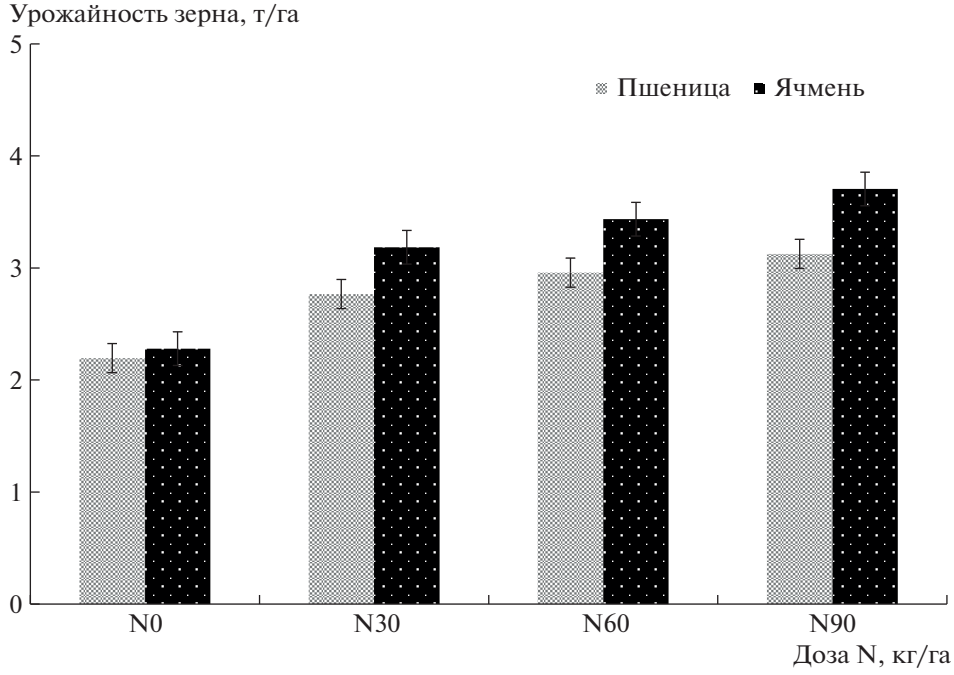

Рис. 1. Среднегодовая урожайность яровой пшеницы и ячменя в полевом опыте при возрастающих дозах азотного удобрения ($НСР_{05}$ частных средних = 0.15).

жайности зерна, хотя и в значительно меньшей степени, чем от N30. Наибольшая урожайность пшеницы и ячменя была получена при дозе N90 и оказалась достаточно высокой – в среднем 3.27 т зерна/га. При этом в острозасушливые годы среднегодовая урожайность зерна в варианте N90 составила 0.74 т/га, в умеренно засушливые – 2.92 и в умеренно увлажненные – 3.99 т/га. Под влиянием азотного удобрения ячмень более значительно, на 15–18%, повышал урожай зерна в сравнении с пшеницей. Таким образом, вариант опыта N90, обеспечивший получение максимальной урожайности зерна, представлял в полевом опыте наиболее интенсивную технологию возделывания зерновых культур.

В табл. 2 представлен среднегодовой баланс азота в почве в вариантах опыта. Поскольку в процессе уборки солому обеих культур заделывали в почву, при расчете сальдо баланса азота учитывали только отчуждение элемента с поля зерном. Результаты показали, что по мере увеличения дозы азотного удобрения баланс азота в почве становился более благоприятным, причем при дозе N90 приход элемента в почву и его отчуждение с поля были примерно равными. Таким образом, максимальная урожайность зерновых в полевом опыте обеспечивалась при близком к нулю расчетном сальдо баланса азота в почве.

Отметим, что в действительности структура расходных и приходных статей баланса азота в почве значительно сложнее, чем это представлено в табл. 2. В частности, в приходной статье следует учесть азот, поступивший в почву вследствие несимбиотической и ассоциативной азотфиксации, а также с семенами, в расходной – количество элемента, потерявшееся из почвы в результа-

Таблица 2. Среднегодовое сальдо баланса азота в почве в вариантах опыта, кг N/га

Вариант	Поступило азота в почву с удобрением	Вынесено азота урожаем			Сальдо
		зерна	соломы	всего	
N0	0	40	17	57	–40
N30	30	62	27	89	–32
N60	60	75	35	110	–15
N90	90	84	41	125	6

те денитрификации. Однако, за исключением азота семян (примерно 6 кг N/га/год), точно учесть эти составляющие баланса азота в полевом опыте практически невозможно. Можно попытаться оценить их ориентировочно и на этой основе прояснить возможные направления изменения рассчитанных сальдо баланса азота в вариантах опыта.

Наиболее реалистичные оценки размеров несимбиотической азотфиксации можно сделать на основании определения баланса азота в почве вариантов длительных полевых опытов без применения азотных удобрений. Например, результаты, полученные в опытах на Ротамстедской опытной станции (Англия), свидетельствовали о ежегодном поступлении в почву вследствие этих процессов 20–30 кг N/га [19]. По данным Шотта [20], в условиях Западной Сибири поступление биологического азота в злаковые агроценозы в среднем составляет 30 кг/га/год. Близкие к этой величине оценки приведены и в недавно опубликованном по данной проблеме обзоре [21]. Что касается ежегодных денитрификационных потерь азота удобрения, то, по данным опытов с ^{15}N, в западно-сибирских черноземах они составляют ≈20% от дозы [9]. Если принять, что в такой же степени терялся и минеральный азот почвенного происхождения, можно ориентировочно оценить суммарные денитрификационные потери азота почвы и удобрения в вариантах опыта. При допущении отсутствия существенного влияния азотного удобрения на изменение среднегодовой скорости минерализации почвенного азота, можно рассчитать, что в варианте с ежегодным применением N90 (табл. 2) в распоряжении растений в течение периода вегетации было ≈150 кг N/га/год (90 – азот удобрения, 57 – азот почвы). Следовательно, денитрификационные потери азота почвы и удобрения могли составить в варианте N90 ≈ 30 кг N/га/год (20% от 150), т.е. примерно соответствовали размеру несимбиотической азотфиксации. Хотя эти расчеты ориентировочные, тем не менее, они свидетельствовали в пользу близкого соответствия рассчитанных в табл. 2 сальдо баланса азота фактическим величинам.

Неожиданными оказались результаты определения в конце опыта содержания $N\text{-}NO_3$ в почвенном профиле. Под влиянием ежегодного 12-летнего применения N90 запас нитратного азота в слое 0–100 см почвы увеличился в 2.3, 0–200 см – в 6.4 раза (рис. 2). В слое 100–200 см кратность увеличения была много больше, поскольку в варианте N0 накопления азота нитратов практически не было, а в варианте N90 оно составило ≈270 кг/га. В целом под влиянием ежегодного применения N90 запас $N\text{-}NO_3$ в слое 0–200 см почвы увеличился на 350 кг/га. От всего примененного за период опыта количества азота удобрения (1080 кг/га) это составило 32%, т.е. примерно третью часть. Таким образом, хотя при ежегодном применении N90 баланс азота в поле был близок к бездефицитному, значительная часть элемента в почве (≈350 кг N/га) находилась в нитратной форме, причем из них около 270 кг N/га мигрировало в слой 100–200 см.

Проблема накопления в почвенном профиле нитратного азота особенно остра для стран, в которых из-за дефицита сельскохозяйственных угодий стремятся получать максимальную урожайность, применяя интенсивные технологии возделывания культур. Это вполне понятно, поскольку для получения такой урожайности применяют высокие дозы азотных удобрений, и в результате в почвах складывается положительное сальдо баланса азота. К числу таких стран относятся, в частности, Китай и большинство государств Европы, где уже несколько десятилетий приход азота в почву значительно превышает отчуждение элемента с поля продукцией. Например, изучение практики применения азотных удобрений фермерами Китая показало [22], что при средних дозах азота под пшеницу 212 кг/га и получаемой урожайности зерна 4.9 т/га в почвах складывался положительный баланс азота с сальдо 89 кг/га. Значительно более неблагоприятная ситуация создавалась в этом случае на овощных и фруктовых полях, где при дозах азота соответственно 439 и 592 кг/га избыток элемента в почвах составил 356 и 464 кг/га. По данным Евростат [23], в 2015 г. в среднем в странах Евросоюза избыток азота в сельскохозяйственных угодьях (разница между суммарным поступлением в почву и отчуждением с поля) составлял ≈50 кг/га. Наибольшим (194 кг N/га) он был на Кипре, наименьшим (9 кг/га) – в Румынии.

Хорошо известно [24–26], что избыток азота в почвах сельскохозяйственных угодий порождает многие экологические проблемы, наиболее острыми среди которых являются подкисление почв (вследствие нитрификации NH_3), загрязнение источников воды и продукции нитратами, эвтрофикация водоемов, увеличение выброса в атмосферу парникового газа N_2O. Поэтому наиболее разумный подход, который пытаются реализовывать страны с высокоинтенсивным земледелием, заключается в постепенном уменьшении поступления азота в почвы агроценозов без снижения или даже при некотором повышении урожайности культур. Последнее достигается благодаря увеличению отдачи от применяемых удобрений

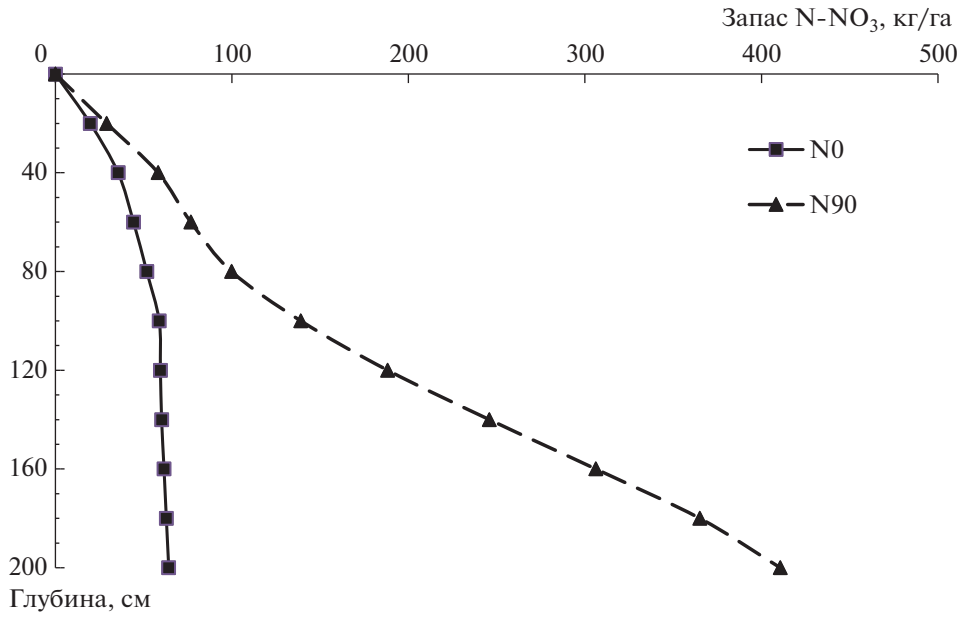

Рис. 2. Запасы нитратного азота в слоях различной глубины после 12-летнего использования почвы в вариантах применения N0 и N90.

за счет различных усовершенствований агротехнологий. Такой политики придерживаются, в частности, страны Евросоюза, в которых в сравнении с 2004–2006 гг. среднегодовое сальдо баланса азота в почвах сельскохозяйственных угодий в 2013–2015 гг. уменьшилось с 54 до 49 кг/га [23].

Отличительной особенностью полученных нами результатов явилось то, что накопление нитратного азота в почвенном профиле произошло, как уже отмечено, при функционировании системы почва–растение–удобрение без значительного превышения среднегодового поступления азота в почву над его отчуждением с поля. Основная причина этого накопления заключается в сравнительно слабой способности пахотных почв связывать избыток минерального азота в органические соединения. На это указывал в недавнем обзоре Кудеяров [27]: различия в содержании в почве общего азота между вариантами длительных опытов с применением и без применения минерального азотного удобрения практически отсутствуют. В нашем опыте увеличение концентрации минерального азота в почве от ежегодной дозы N90, особенно из-за недоиспользования азота растениями в засушливые годы, создавало предпосылки для миграции нитратов вглубь почвенного профиля, где они становились относительно малодоступными растениям. Известно [28], что основная масса вторичных корней яровой пшеницы концентрируется в слое 0–60 см, поэтому можно полагать, что таковыми становились нитраты, мигрировавшие глубже этого слоя. Вероятно, в сибирских черноземах эта миграция происходит в основном в дождливый осенний период. Об этом свидетельствуют многолетние наблюдения за запасами влаги в профиле черноземов [29]: за счет таяния снега весной дополнительно увлажняется только слой почвы 0–50 см, запасы влаги в слоях 50–100 и 100–150 см остаются равными осенним запасам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В многолетнем полевом опыте на черноземе выщелоченном исследовали возможность рационального использования азотных удобрений при выращивании зерновых культур по интенсивной технологии. Исходили из допущения, что удобрения расходуются рационально, если технология обеспечивает получение максимальной урожайности культур, ограниченной гидротермическими ресурсами территории, и при этом в почвенном профиле не происходит накопления значительных количеств минерального азота. Полагали, что для предотвращения такого накопления достаточно стремиться поддерживать в почве бездефицитный баланс азота, т.е. получать максимальную урожайность культур при минимально необходимых дозах азотного удобрения.

Проверку обоснованности этих в целом разумных допущений осуществили в многолетнем полевом опыте, представляющем собой двуполь-

ный севооборот пшеница–ячмень. Культуры выращивали в течение 12 лет при ежегодном применении возрастающих доз азотного удобрения (N0, N30, N60, N90) и комплекса средств защиты растений от вредных организмов. Самым интенсивным вариантом использования чернозема выщелоченного оказался вариант с ежегодным применением под культуры N90. В этом варианте была получена максимальная среднегодовая урожайность зерна – 3.27 т/га, причем баланс азота в почве в период опыта был близок к бездефицитному. В остальных вариантах урожайность зерна была существенно меньше, а баланс азота в почве тем дефицитнее, чем меньше доза азотного удобрения.

Неожиданными оказались результаты определения в конце опыта запаса нитратного азота в почве, которую 12 лет использовали по интенсивной технологии при ежегодном применении N90. Несмотря на бездефицитный среднегодовой баланс азота в почве, в этом случае в слое 0–200 см дополнительно накопилось ≈350 кг $N\text{-}NO_3$/га – примерно третья часть от всего внесенного в почву количества азота удобрения. При этом бóльшая часть нитратного азота (≈270 кг N/га) находилась в слое 100–200 см почвы.

Проблема накопления нитратов в почвенном профиле очень актуальна для стран с высокоинтенсивным земледелием, где под культуры вносят высокие дозы азотных удобрений, создавая в почвах положительный баланс азота. Отличительной особенностью нашего исследования явилось то, что значительное обогащение почвенного профиля нитратами произошло при примерно бездефицитном балансе азота в почве, причем за сравнительно непродолжительный период опыта. Можно полагать, что этому способствовали, во-первых, относительно невысокая емкость пахотных почв к закреплению минерального азота в органических соединениях, и, во-вторых, свойственные сибирскому климату июньско-июльские засухи, под влиянием которых внесенный в почву азот слабо использовали растения и в дальнейшем, при наступлении дождливой осени он вымывался вглубь почвенного профиля.

Таким образом, стремление к получению на сибирских черноземах максимальной урожайности зерновых культур с помощью интенсивных агротехнологий должно обосновываться не только с позиции экономической эффективности, но и экологической безопасности. При этом острота экологического аспекта проблемы, по-видимому, может быть существенно снижена благодаря различным усовершенствованиям агротехнологий, позволяющим, с одной стороны, уменьшать дозы удобрений, с другой, – повышать способность культур усваивать минеральные соединения азота из нижележащих горизонтов почвы (локальные способы внесения азота в почву, включение в севооборот трав и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межрегиональная схема размещения и специализации сельскохозяйственного производства в субъектах Российской Федерации Сибирского федерального округа: рекомендации. Новосибирск: ФГБУ СО АН, 2016. 255 с.
2. Регионы России. Социально-экономические показатели. Стат. сб. М.: Росстат, 2018. 1162 с.
3. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия Новосибирской области. Новосибирск: Сиб. отдние, СибНИИЗХим, 2002. 388 с.
4. *Холмов В.Г., Юшкевич Л.В.* Интенсификация и ресурсосбережение в земледелии лесостепи Западной Сибири. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2005. 396 с.
5. *Шарков И.Н., Захаров Г.М., Крупская Т.Н.* Эффективность применения средств химизации под яровую пшеницу в лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2017. № 6. С. 16–18.
6. *Шарков И.Н.* Проблемы интенсификации технологий возделывания зерновых культур в Сибири // Инновации и продовол. безопасность. 2016. № 1 (11). С. 24–32.
7. *Шарков И.Н.* Проблемы применения удобрений под зерновые культуры в Сибири // Научное наследие академика Д.Н. Прянишникова и современные проблемы агрохимии. Докл. Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 150-летнему юбилею акад. Д.Н. Прянишникова (Москва, 10–11 ноября 2015 г.). М.: ВНИИА, 2015. С. 367–373.
8. *Кук Д.У.* Системы удобрения для получения максимальных урожаев. М.: Колос, 1975. 416 с.
9. *Гамзиков Г.П.* Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: РАСХН, СО, НовосибирскГАУ, 2013. 790 с.
10. *Синягин И.И., Кузнецов Н.Я.* Применение удобрений в Сибири. М.: Колос, 1979. 373 с.
11. *Кирюшин В.И., Ткаченко Г.И.* О нисходящей миграции нитратов в черноземах Сибири при сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1986. № 2. С. 34–44.
12. *Гаджиев И.М., Дергачева М.И., Караваева Н.А., Курачев В.М., Шоба В.Н.* Генезис, эволюция и география почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, СО, 1988. 223 с.
13. *Шарков И.Н., Колбин С.А.* Влияние погодных условий вегетационного периода на урожайность яровой пшеницы и эффективность азотного удобрения в лесостепи Приобья // Вестн. НГАУ. 2020. № 1 (54). С. 33–41.
14. Сельскохозяйственный энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1989. 636 с.

15. *Иодко С.Л., Шарков И.Н.* Новая модификация дисульфофенолового метода определения нитратов в почве // Агрохимия. 1994. № 4. С. 95–97.

16. *Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.В.* Изменение органического вещества чернозема выщелоченного при минимизации обработки в лесостепи Западной Сибири // Почвоведение. 2016. № 7. С. 892–899.

17. *Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.В., Шепелев А.Г.* Влияние пожнивных остатков на состав органического вещества чернозема выщелоченного в лесостепи Западной Сибири // Почвоведение. 2014. № 4. С. 473–479.

18. *Сорокин О.Д.* Прикладная статистика на компьютере. Новосибирск: СО РАСХН, 2008. 217 с.

19. *Кудеяров В.Н., Кузнецова Т.В.* Оценка размеров несимбиотической азотфиксации в почве методом баланса // Почвоведение. 1990. № 11. С. 79–89.

20. *Шотт П.Р.* Фиксация атмосферного азота в однолетних агроценозах. Барнаул: Изд-во Азбука, 2007. 170 с.

21. *Завалин А.А., Алферов А.А., Чернова Л.С.* Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2019. № 8. С. 83–96.

22. *Zhang W.F., Dou Z.X., He P., Ju X.T., Powlson D., Chadwick D., Norse D., Lu Y.L., Zhang Y., Wu L., Chen X.P., Cassman K.G., Zhang F.S.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China // Proceed. Nat. Acad. Sci. USA. 2013. V. 110. № 21. P. 8375–8380.

23. Agri-environmental indicator – gross nitrogen balance // Eurostat Statistics Explained. 2018. [Электр. ресурс]. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_gross_nitrogen_balance

24. *Соколов О.А., Семенов В.М.* Теория и практика рационального применения азотных удобрений. М.: Наука, 1992. 207 с.

25. *Lubkowski K.* Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge // Polish J. Chem. Technol. 2016. V. 18. P. 72–79.

26. *Qu Z., Wang J., Almøy T., Bakken L.R.* Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high $N_2O/(N_2O+N_2)$ product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils // Global Change Biol. 2014. V. 20. № 21. P. 1685–1698.

27. *Кудеяров В.Н.* Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // Агрохимия. 2018. № 10. С. 3–11.

28. *Кумаков В.А.* Биологические основы возделывания яровой пшеницы по интенсивной технологии. М.: Росагропромиздат, 1988. 104 с.

29. *Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П., Филимонова Д.А.* Весенний дефицит влаги в профиле эродированных черноземов в зависимости от увлажнения территории Юго-Востока Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 8. С. 935–945.

Problem of Nitrogen When Using Leached Cherozem on Intensive Technology in Forest-Steppe of Western Siberia

I. N. Sharkov[a,#], S. A. Kolbin[a], and L. M. Samokhvalova[a]

[a] *Siberian Research Institute of Agronomy and Agricultural Chemistry SFSCA RAS post-office box 463, Krasnoobsk, Novosibirsk district 630501, Russia*

[#] *E-mail: humus3@yandex.ru*

Cereals were grown in a long-term (12 years) field experiment, laid on leached chernozem in the central forest-steppe of the Novosibirsk Ob region. The experiment was a two-field wheat–barley crop rotation with annual application of increasing doses of nitrogen (N0, N30, N60, N90) and a complex of plant protection products from pests for crops. The purpose of the study was to assess the situation with mineral nitrogen in the soil – plant system when using intensive technology the maximum yield of grain crops was obtained. With sufficient use of fertilizers and plant protection products, this yield is determined mainly by the current hydrothermal conditions of the territory. The highest average annual grain yield, quite high for Siberia, was obtained in variant N90 – 3.27 t/ha, and in the driest years it decreased to 0.74, in moderately moist years it increased to 3.99 t/ha. The most scarce average annual nitrogen balance in the soil (-40 kg/ha) was formed on plots without the use of nitrogen fertilizer. Under the influence of nitrogen fertilizer, the nitrogen balance became more favorable and in the N90 variant was close to deficient. Despite this, at the end of the experiment, a significant part of the nitrogen in this experiment variant – approximately 350 kg/ha (32% of the amount introduced into the soil during the experiment) – was found in the form of nitrates in the soil layer of 0–200 cm. The agrometeorological features of spring cultivation are discussed cereals in the Siberian region, contributing to the migration of nitrates deep into the soil profile. It is concluded that the desire to obtain maximum crop yields on Siberian chernozems using intensive technologies should be justified not only from the standpoint of economic efficiency, but also environmental safety.

Key words: nitrogen fertilizer, nitrogen balance in the soil, migration of nitrates in the soil, crops, intensive technology.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 11–20

Плодородие почв

УДК 631.416.2:631.459:631.445.4:631.811.2

ФОРМЫ ФОСФОРА В ЭРОДИРОВАННЫХ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ИХ РОЛЬ В МИНЕРАЛЬНОМ ПИТАНИИ РАСТЕНИЙ

© 2021 г. В. М. Назарюк[1], Ф. Р. Калимуллина[1,*]

[1] Институт почвоведения и агрохимии
630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 8/2, Россия
E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 21.01.2020 г.
После доработки 03.06.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

В почвенном профиле выявлено существенное снижение содержания органического фосфора, значительно меньшее в группе минеральных фосфатов. По мере усиления эродированности почвы содержание и запасы фосфатов снижались, особенно в группе органических. Обнаружены также изменения в содержании подвижных форм фосфора. В некоторых слоях гумусово-аккумулятивного горизонта неэродированной почвы содержание легкоподвижного фосфора было больше, чем в эродированной примерно в 2.0–2.5 раза. Содержание и запасы подвижного и малоподвижного фосфора в гумусово-аккумулятивном горизонте были значительно меньше, чем в иллювиальных горизонтах В1 и В2. Это связано с непропорциональным образованием минеральных фосфатов в почве и их потреблением растениями в период вегетации, что обусловлено спецификой гидротермических условий среды. Внесение фосфорных удобрений способствовало повышению содержания подвижного фосфора в почве на 22–33% и продуктивности растений на 19–37%.

Ключевые слова: эродированная почва, гумус, формы фосфора, удобрение, растение.

DOI: 10.31857/S0002188120120066

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое и экологически безопасное функционирование агроэкосистем во многом зависит от состояния фосфатного фонда почв [1–3]. При формировании продуктивности растений при их выращивании по экстенсивной технологии потребность в фосфорном питании удовлетворялась во многом за счет почвенных ресурсов, либо применением невысоких доз фосфорных удобрений [4]. Однако при создании условий, обеспечивающих интенсивный рост растений, потребность в фосфоре резко возрастает [5]. Поэтому важно знать состояние и возможности природного фосфатного фонда и роль удобрений в интенсификации продукционного процесса. По данным [6], для почв юго-восточной части Западной Сибири присуще высокое содержание общего фосфора, значительная часть которого представлена (48% от валового) минеральной формой, высокоосновными соединениями кальция (13.6%) и окклюдированными фосфатами (22.6%). К тому же, содержание фосфора и его форм зависит от специфики геоморфологического и геохимического накопления элемента в почвенной толще. Исследованные лугово-черноземные почвы относятся к структуре минеральных фосфатов Приобского типа [7]. Для них характерно высокое содержание элемента в материнских породах – до 90–100 мг/100 г, доля высокоосновных фосфатов оказалась в них значительно больше по сравнению с другими типами почвообразования. Показано [8], что в лугово-черноземных почвах Западно-Сибирской провинции фосфор связан в основном с органическим веществом, среди минеральных форм преобладают фосфаты алюминия и железа, что снижает активность усвоения фосфатов растениями. В выпаханных лугово-черноземных почвах большую роль в восстановлении их плодородия играют не только удобрения, но и состояние природных экосистем, например, при зарастании почв березовыми и осиновыми лесами значительно активизируются процессы аккумуляции фосфора [9]. Показана доступность и запасы почвенных фосфатов пахотного и подпахотного слоев и их роль в снабжении растений соответствующим элементом [10]. Малоизученной остается проблема распределе-

ния форм фосфора по профилю лугово-черноземных почв, особенно эродированных, а также их доступность растениям и необходимость обоснованного применения удобрений. Актуальность данного почвенно-агрохимического направления возрастает в связи с нестабильными гидротермическими и обостряющимися экологическими условиями.

Цель работы – оценка фосфатного фонда эродированных лугово-черноземных почв и возможности его регулирования и эффективного использования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевое исследование проводили в Новосибирской обл. в Тогучинском р-не (территория Присалаирья, юго-восток Западно-Сибирской равнины). Объекты исследования – лугово-черноземные среднемощные тяжелосуглинистые почвы (пологий склон северо-восточной экспозиции) различной степени эродированности. Содержание общего гумуса и валового азота в лугово-черноземной неэродированной почве – 5.6 и 0.28%, слабоэродированной – 4.5 и 0.2, среднеэродированной – 3.4 и 0.19% соответственно, средне обеспечена подвижным фосфором. Содержание обменного калия в неэродированной почве составило 14.5, среднеэродированной – 15.6 мг/100 г. Величина pH_{H_2O} находилась в пределах 5.3–5.5.

Микрополевые опыты с луговыми травами, яровой пшеницей (сорт Новосибирская 22) и картофелем (сорт Луговской) проводили на делянках, обернутых полиэтиленовой пленкой на глубину пахотного слоя, общей площадью 1 м^2 и учетной – 0.25 м^2. Минеральные удобрения вносили в виде $N_м$, $P_{сг}$ и $K_х$. Для изучения сравнительной оценки эффективного плодородия антропогенно-преобразованных почв отбирали образцы многолетних трав, пшеницы и картофеля в трех-, четырехкратной повторности. Образование минеральных фосфатов при компостировании эродированных почв определяли при температуре 8–10 и 22–25°С в течение 45 сут.

Аналитическую работу выполняли следующими методами: в почвенных образцах определяли гумус по Тюрину, общий азот – по Кьельдалю с предварительным озолением образцов в смеси серной и хлорной кислот с восстановителем Кудеярова. Зольные питательные элементы в почве определяли на основе следующих методов: легкоподвижный фосфор – по Карпинскому–Замятиной, подвижный фосфор – по Чирикову, малоподвижный (нами предложенная форма фосфора) – в 1 н. HCl при соотношении почва : раствор = 1 : 25, органический фосфор – по разности между его валовым и минеральным содержанием по Хейфиц, валовой фосфор – по Гинзбург и др., обменный калий – по Масловой, нитратный азот – потенциометрическим способом с использованием ион-селективного электрода. Содержание биогенных элементов в растениях определяли следующими методами: общий азот после мокрого озоления – по Кьельдалю, фосфор – колориметрическим методом, калий – на атомно-адсорбционном спектрофотометре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение форм фосфора по профилю лугово-черноземной почвы показало, что их содержание и распределение по профилю зависели от степени геоморфологического воздействия и специфики формирования почвенных горизонтов (табл. 1). В пахотном слое неэродированной почвы доли органических и минеральных фосфатов находились примерно в равном соотношении, с глубиной ситуация резко менялась даже в пределах одного горизонта А. Например, содержание органических фосфатов в слое 30–40 см относительно слоя 0–10 см уменьшилось в 4 раза, а в слое 50–60 см снизилось даже в 8 раз. Содержание минеральных фосфатов по сравнению с органическими в почвенном профиле изменялось в небольших пределах – 0.07–0.09%. В слабоэродированной почве содержание органических фосфатов в слоях 0–10 и 10–20 см в сравнении с аналогичным слоем неэродированной почвы уменьшилось на 0.25–0.28%. На глубине 50–60 см присутствие этой формы фосфора выровнялось и достигло 0.01%. Минеральные фосфаты распределялись по почвенному профилю довольно равномерно, величина их менялась в пределах 0.06–0.08%. В среднеэродированной почве содержание минеральных фосфатов изменялось также незначительно. В то же время содержание органических фосфатов в среднеэродированной почве по сравнению с неэродированной и слабоэродированной почвой снизилось примерно от 2.0 до 3.5 раза. Отсюда видно, что в результате процессов водной эрозии наибольшие изменения в содержании фосфатов происходили в группе органических фосфатов. Это отражалось на содержании валового P по профилю эродированных почв и его запасах. Обычно максимальное количество элемента аккумулируется в гумусовом горизонте, минимальное – в иллювиальном [11–13].

Таблица 1. Содержание и запасы форм фосфора по профилю эродированной лугово-черноземной почвы

Глубина, см	Горизонт	Минеральный		Органический		Валовой	
		1	2	1	2	1	2
Неэродированная почва							
0–10	Апах	0.09	0.98	0.08	0.87	0.17	1.85
10–20		0.08	0.87	0.07	0.76	0.15	1.63
20–30	А	0.07	0.84	0.03	0.36	0.10	1.20
30–40		0.07	0.84	0.02	0.24	0.09	1.08
40–50	АВ	0.07	0.94	0.02	0.27	0.09	1.21
50–60		0.08	1.07	0.01	0.13	0.09	1.20
60–70	В1	0.08	1.16	0.01	0.14	0.09	1.30
70–80		0.07	1.02	0.02	0.29	0.09	1.31
80–90	В2	0.08	1.21	0.01	0.15	0.09	1.36
90–100		0.07	1.06	0.01	0.15	0.08	1.21
Слабоэродированная почва							
0–10	А	0.08	0.87	0.06	0.65	0.14	1.52
10–20		0.08	0.87	0.05	0.54	0.13	1.41
20–30		0.07	0.84	0.02	0.24	0.09	1.08
30–40	А+АВ	0.07	0.84	0.02	0.24	0.09	1.08
40–50		0.07	0.92	0.01	0.13	0.08	1.05
50–60	В1	0.06	0.79	0.01	0.13	0.07	0.92
60–70		0.06	0.87	0.01	0.14	0.07	0.94
70–80		0.06	0.87	0.02	0.29	0.08	1.16
80–90	В2	0.07	1.06	0.01	0.15	0.08	1.21
90–100		0.06	0.91	0.01	0.15	0.07	1.06
Среднеэродированная почва							
0–10	А+АВ	0.08	0.87	0.03	0.33	0.11	1.20
10–20		0.07	0.76	0.02	0.22	0.09	0.98
20–30	АВ	0.08	0.96	0.01	0.12	0.09	1.08
30–40		0.08	0.96	0.01	0.12	0.09	1.08
40–50	В1	0.09	1.18	0.01	0.13	0.10	1.31
50–60		0.09	1.18	0.01	0.13	0.10	1.31
60–70	В2	0.07	1.02	0.01	0.14	0.09	1.16
70–80		0.06	0.87	0.02	0.29	0.08	1.16
80–90		0.06	0.91	0.01	0.15	0.07	1.06
90–100	С	0.06	0.91	0.01	0.15	0.07	1.06
$НСР_{05}$		0.004	0.05	0.01	0.02	0.01	0.15

Примечание. В графе 1 – содержание, %; 2 – запасы, т/га.

По содержанию органических и минеральных форм фосфора в почве весьма сложно судить об обеспеченности растений фосфорным питанием [2]. Более надежную информацию о состоянии фосфатного фонда, от которого зависит функционирование агроценозов, можно получить на основе содержания подвижных форм [14]. Выявлено, что содержание легкоподвижного фосфора в неэродированной почве аккумулировалось в слое 0–10 см, с глубиной оно постепенно снижалось и достигало минимума в слое 90–100 см (табл. 2). В слабоэродированной и среднеэродированной почвах закономерность была иной. В первом случае минимальное содержание отмечено уже в слое 30–40 см и вновь обнаруживалось в слое 90–100 см, во втором случае минимальное содержа-

Таблица 2. Содержание и запасы подвижных форм фосфора и их распределение по почвенному профилю

Глубина, см	Легкоподвижный (0.03 н. K_2SO_4)		Подвижный (0.5 н. CH_3COOH)		Малоподвижный (1 н. HCl)	
	1	2	1	2	1	2
Неэродированная почва						
0–10	1.52	16.6	175	191	638	695
10–20	0.92	10.0	167	182	604	658
20–30	0.49	5.9	136	163	559	671
30–40	0.32	3.8	150	180	542	650
40–50	0.31	4.1	186	249	556	745
50–60	0.34	4.6	264	354	723	969
60–70	0.20	2.9	274	397	706	1020
70–80	0.09	1.2	263	381	678	983
80–90	0.07	1.1	175	264	723	1090
90–100	0.06	1.1	167	252	641	968
Слабоэродированная почва						
0–10	0.72	7.6	164	179	619	675
10–20	0.27	2.7	150	164	612	667
20–30	0.18	2.4	159	191	613	668
30–40	0.06	0.7	273	328	791	862
40–50	0.07	0.9	270	362	804	1080
50–60	0.16	2.1	245	328	766	1030
60–70	0.09	1.3	191	277	661	958
70–80	0.08	1.2	136	197	599	868
80–90	0.07	1.1	168	254	625	944
90–100	0.06	0.9	163	246	558	843
Среднеэродированная почва						
0–10	0.60	6.5	192	209	634	691
10–20	0.24	2.2	202	220	597	651
20–30	0.11	1.1	268	322	734	881
30–40	0.07	0.8	282	338	757	908
40–50	0.06	0.8	263	352	773	1040
50–60	0.02	0.3	242	324	744	997
60–70	0.03	0.4	164	237	601	871
70–80	0.05	0.7	130	196	538	780
80–90	0.06	0.9	135	195	538	812
90–100	0.08	1.2	126	190	511	772
HCP_{05}	0.01	0.1	19	33	66	87

Примечание. В графе 1 – содержание, мг/кг, 2 – запасы, кг/га.

ние легкоподвижного фосфора отмечено в слое 50–60 см, а затем заметно повышалось и достигло максимума на 1-метровой глубине. Запасы легкоподвижного фосфора были также максимальными в неэродированной почве в горизонтах А + АВ, значительно меньше – в слабоэродированной и еще меньше – в среднеэродированной.

В содержании подвижного фосфора в почвах наблюдали другую закономерность, связанную с накоплением элемента в гумусовом горизонте. Максимальное количество этой формы фосфора отмечено в среднеэродиованной почве, в неэродированной и слабоэродированной почвах его было существенно меньше. С глубиной содержа-

ние фосфора в профиле этих почв изменяется поразному. В неэродированной почве максимальное количество подвижного фосфора отмечено в иллювиальном горизонте B1, но постепенно оно снижалось и достигло минимума в горизонте B2 (слой 90–100 см). В слабоэродированной почве увеличение содержания подвижного фосфора начиналось несколько раньше, со слоя 20–30 см и достигло наибольшей величины в слоях 30–40 и 40–50 см. С глубиной оно постепенно снижалось и оказалось наименьшим в слое 90–100 см. В среднеэродированной почве увеличение содержания подвижного фосфора началось с гумусового и переходного горизонтов A + AB и AB. Наивысшая аккумуляция доступного растениям фосфора отмечена в слое 30–40 см, затем его количество снижалось и достигло минимума в материнской породе C. Запасы подвижного фосфора и его распределение по профилю почвы также зависели от степени ее эродированности и сформированного почвенного горизонта. Максимальные запасы этой формы фосфатов в 1-метровом слое (~2700 кг/га) отмечали в среднеэродированной почве, заметно меньшие (2600 кг) – в неэродированной и еще меньшие (2500 кг/га) – в слабоэродированной.

В отношении малоподвижного фосфора во многом повторялась закономерность распределения подвижных фосфатов, хотя и наблюдали определенные отличия. Например, в неэродированной почве максимальное содержание малоподвижных фосфатов обнаруживалось на глубине 50–60 и 80–90 см. В слабоэродированной почве наибольшее содержание этой формы фосфора отмечено только один раз на глубине от 30 до 50 см. С глубиной оно снижалось до 30%. По профилю среднеэродированной почвы постепенное повышение содержания малоподвижных фосфатов начиналось с горизонта A и достигло наибольшей величины в слое 40–50 см. С увеличением глубины отбора образцов обнаруживали значительное уменьшение темпов аккумуляции этого элемента. В целом запасы малоподвижных фосфатов в 1-метровом слое в неэродированной почве составили примерно 8500 кг, в слабоэродированной – 8600 кг и в среднеэродированной – 8400 кг/га.

Полученные результаты однозначно свидетельствовали о повышенном содержании подвижной и малоподвижной форм фосфора в переходном гумусовом и иллювиальных горизонтах. Объяснить такое распределение элемента по почвенному профилю, не прибегая к специальным дополнительным исследованиям, сложно. Потребовалось выяснить влияние тепловых воздействий и компостирования почвы на содержание наиболее подвижных форм фосфора, которые более изменчивы в течение вегетационного периода. Были взяты почвенные образцы неэродированной и среднеэродированной почв. Увлажняли их до 80% от ППВ и поддерживали заданную влажность почв в течение всего исследованного периода. Компостировали почвенные образцы в течение 45 сут при температуре 5–10 и 20–25°C. Результаты исследования показали, что в содержании легкоподвижного фосфора четкой закономерности не выявлено. Под влиянием температуры и эродированности почвы наблюдали как повышение содержания этой формы фосфора, так и его снижение (рис. 1). Поскольку значительное количество фосфора содержится в органическом веществе, то под влиянием микроорганизмов и повышенной температуры должен накапливаться легкоподвижный фосфор. Однако этого в эксперименте не наблюдали. По нашему мнению, такое явление связано с тем, что при динамически равновесном состоянии фосфор относительно легко может переходить из одной формы в другую. В отличие от легкоподвижных фосфатов содержание подвижного фосфора в почвах достоверно повышалось при компостировании при разных интервалах температур. Однако эродированность почвы не отразилась на ее фосфатминерализующей способности. Такое явление, вероятно, связано с тем, что наряду с накоплением подвижного фосфора в почве происходит аккумуляция нитратного азота, который по принципу обратной связи ингибирует процессы минерализации органического вещества и, в конечном итоге, выравнивает интенсивность действия исследованных факторов. В естественных условиях в пределах одной и той же лесостепной зоны полугидроморфная лугово-черноземная почва формируется как более холодная, чем автоморфная, например, черноземная. В нижних горизонтах она прогревается медленнее [15], что сказывается на усвоении элементов питания и ростовых процессах. В лугово-черноземной почве корневая система лучше развивается в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте, там активнее усваивается растениями фосфор и другие питательные элементы. К тому же потребность в них в первую половину вегетации существенно больше, чем во вторую. После того, как прогреется корнеобитаемый слой, фосфатминерализующая способность почвы возрастает, однако потребность растений в фосфоре снижается. Происходит дисбаланс в образовании минеральных фосфатов и их потреблении растениями. В результате многолетнего воздействия гидротермических условий наблюдаем результат почвенных процессов, вызывающих

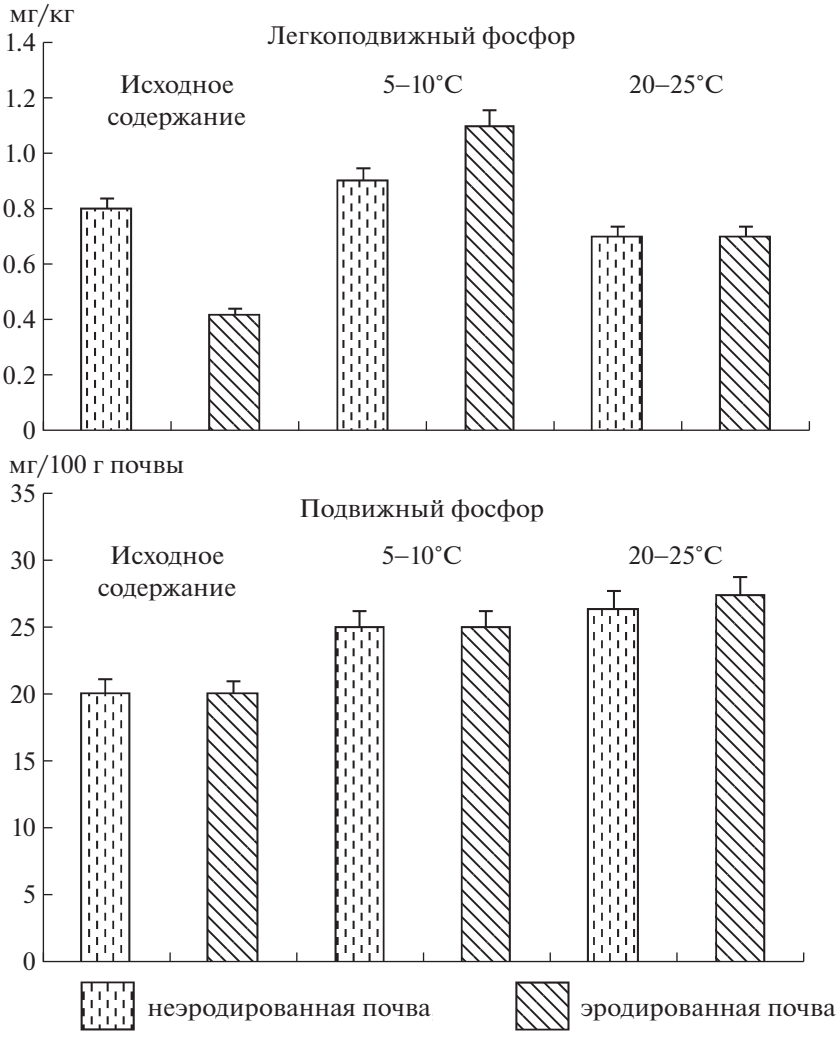

Рис. 1. Влияние компостирования и эродированности почвы на содержание в ней форм фосфатов.

накопление подвижного и малоподвижного фосфора в переходном гумусово-аккумулятивном горизонте АВ и иллювиальных В1 и В2.

Сведения о содержании и запасах подвижных форм фосфора в эродированных почвах недостаточны для оценки обеспеченности растений элементом в течение вегетационного периода. Необходимо было определить содержание подвижных соединений фосфора в начале и конце вегетационного периода. Исследования показали, что обеспеченность растений этим элементом зависела от эродированности почвы и применения фосфорных удобрений (рис. 2). В опыте 2009 г. содержание подвижных фосфатов в среднеэродированной почве в фазе кущения растений было заметно больше, чем в неэродированной (вариант NK). В укосную спелость разница в содержании фосфатов в почвах различной эродированности выравнилась. Внесение фосфорных удобрений повысило содержание подвижных фосфатов в среднеэродированной почве во все периоды наблюдений, в неэродированной почве достоверные различия в количестве фосфатов отмечали только в фазе кущения. Можно полагать, что внесение удобрений в эффективных дозах не только повысило содержание подвижных фосфатов в почве, но и удовлетворило потребность растений в данном элементе.

На основе результатов продуктивности растений выявлена различная эффективность минеральных удобрений в исследованных почвах (табл. 3). Совместное внесение азота и калия в неэродированную почву в условиях 2009 г. практически не отразилось на урожайности луговых трав, но существенно повысило ее в 2013 г. На среднеэродированной почве усиленное азотно-калийное питание вызвало достоверное увеличение продуктивности травянистых растений.

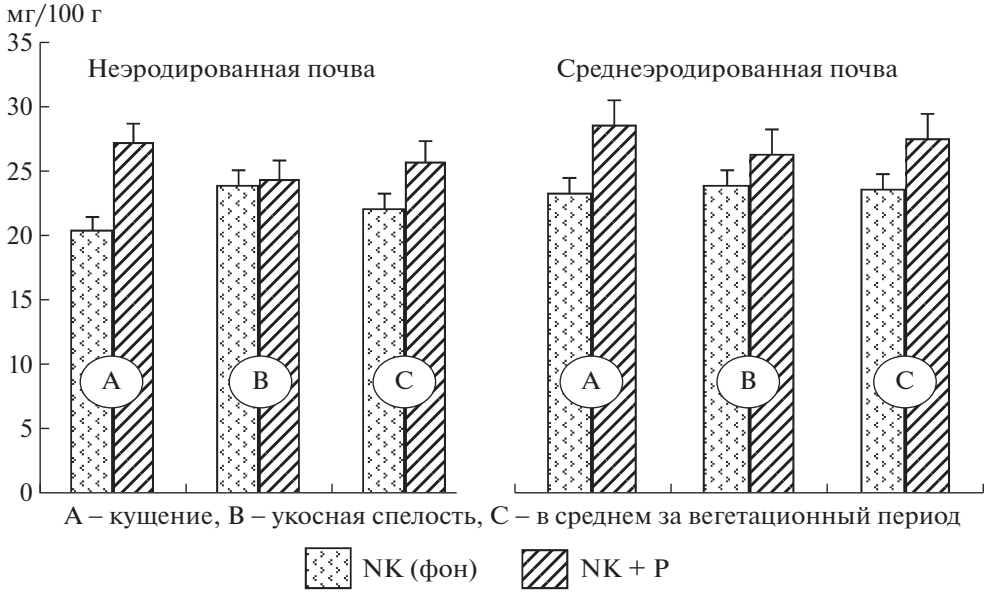

Рис. 2. Влияние эродированности почвы и фосфорных удобрений на содержание подвижного фосфора в пахотном слое.

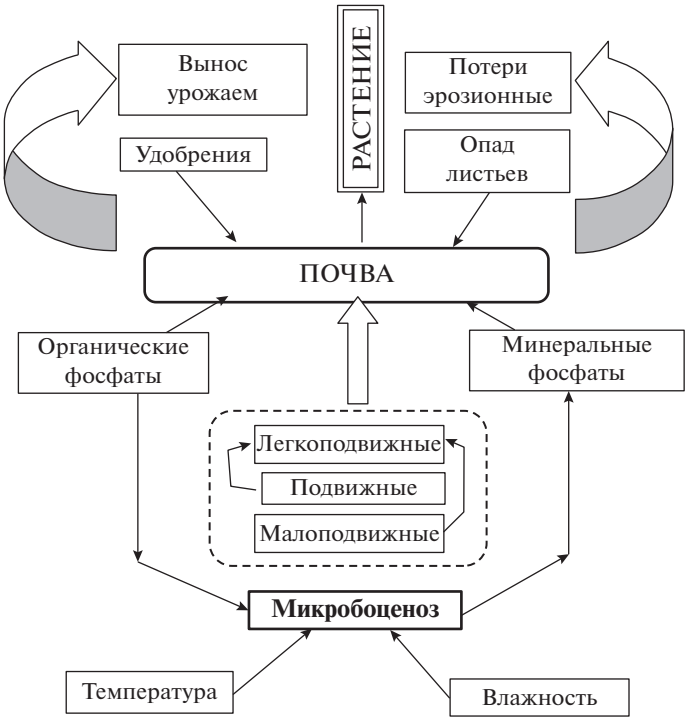

Рис. 3. Модель состояния фосфатного ресурса эродированных лугово-черноземных почв Приобья.

Использование полного минерального удобрения существенно повысило урожайность сельскохозяйственных культур независимо от условий года и эродированности почвы. Внесение фосфорных удобрений на фоне азота и калия увеличивало продуктивность луговых трав, за исключением варианта N60K60+P60 на среднеэродированной почве в условиях 2013 г. Это, вероятно, связано с изменением содержания фосфора в почве в связи с меняющимися погодными условиями. Этот год был чрезмерно увлажненным по сравнению с 2007 и 2009 гг. Гидротермический коэффициент исследованных лет менялся от 1.04 до 1.49. Под влиянием минеральных удобрений

Таблица 3. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество сельскохозяйственных культур

Вариант	Картофель, 2007 г.		Яровая пшеница, 2009 г.		Луговые травы, 2009/2013 гг.	
	1	2	1	2	1	2
	Урожайность, ц/га					
Контроль	320	210	17.2	9.4	27.5/24.2	24.0/12.6
N60K60	–	–	–	–	31.9/59.0	45.7/28.3
N60P60K60*	470	313	29.0	23.2	43.7/71.8	54.4/30.8
$НСР_{05}$	23	18	2.1	1.3	2.7/4.8	2.6/2.4
Соотношение товарной продукции к вегетативной массе						
Контроль	1.94	2.56	0.60	0.60	–	–
N60P60K60*	2.51	1.06	0.62	0.66	–	–
$НСР_{05}$	0.18	0.11	0.05	0.04	–	–
Содержание сухого вещества, %						
Контроль	23	22	–	–	24.7/41.2	39.2/40.1
N60K60	–	–	–	–	17.8/37.9	41.2/37.4
N60P60K60*	24	21	–	–	20.6/35.7	39.5/35.7
$НСР_{05}$	1.6	1.8	–	–	1.7/2.6	3.2/2.9
Сбор протеина, кг/га						
Контроль	6.9	5.6	175	92.2	176/112	174/39.3
N60K60	–	–	–	–	234/321	291/95.4
N60P60K60*	7.5	6.3	360	265	251/440	323/121
$НСР_{05}$	0.5	0.4	23.7	13.5	16.8/24.2	17.6/5.6

Примечание. В графе 1 – неэродированная почва, 2 – среднеэродированная; над чертой – данные за 2009 г, под чертой – 2013 г.
*Дозы удобрений под картофель N90P90K90.

по-разному изменялось качество продукции. Наблюдали как ее улучшение (существенно увеличился сбор протеина в зерне пшеницы и луговых травах), так и состояние практически без изменений (например, содержание сухих веществ в картофеле).

Моделирование фосфатного фонда эродированных лугово-черноземных почв показало, что основные составляющие регулирования фосфорного питания реализуются путем трансформирования органических и минеральных фосфатов, а также воздействия на почвообразующую породу (рис. 3). Пул этих соединений может уменьшаться или увеличиваться в процессе минерализации почвенного органического вещества или гумификации растительных остатков [16, 17]. Решающую роль в этом блоке играет микробоценоз, активность которого зависит, прежде всего, от температурного и водного режима почв [18]. Поддержание пула органических и минеральных фосфатов можно осуществить лишь в случае сохранения равновесного состояния подвижных форм фосфора. Термодинамика перехода элемента из одного состояния в другое зависит от поступления энергии в систему и расходования ее в процессе усвоения элемента корневой системой растений. Изменить равновесное состояние фосфора в формах различной степени подвижности можно путем влияния на структуру и гранулометрической состав почвы, регулирования гумусного состояния, подбора и регулирования травостоя [19], применения экологически безопасных средств химизации и других приемов интенсификации продукционного процесса растений. В каждом конкретном случае один и тот же агротехнический прием может активизировать процессы аккумуляции энергетически менее затратных, легкодоступных для растений соединений фосфора, либо ингибированию этих процессов. Ясно, что без оптимизации почвенных процессов невозможно добиться экологически безопасной и экономически менее затратной продукции. Особо отметим, что на фосфатный ресурс эродированных почв существенное влияние оказывают как приходные статьи (внесение фосфорных удобрений и поступление элемента с опадом листьев), так и расходные (вынос фосфора урожаем и эрозионные потери, которые сильно зависят от геоморфологии и геохимии почвенного покрова).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение форм фосфора в лугово-черноземных почвах показало, что их содержание и распределение по почвенному профилю имеет свою специфику. Она заключается в том, что гумусовый горизонт растянут, в нем постепенно снижается содержание органического фосфора, но мало изменяется группа минеральных фосфатов. Отношение между органическими и минеральными фосфатами в пахотном слое неэродированной почвы приближается к единице, но в конце гумусового горизонта (слой 50–60 см) оно достигает 0.1, хотя в иллювиальном горизонте В1 иногда составляет 0.3. По мере усиления эродированности почвы содержание и запасы органических фосфатов снижаются в значительно большей степени, чем минеральных, и стабилизируются на низком уровне в горизонтах, контактирующих с материнской породой.

Под влиянием водной эрозии в почвенном профиле неэродированной почвы изменяются подвижные формы фосфора, особенно во фракции легкоподвижных соединений. В слое 0–10 см гумусово-аккумулятивного горизонта содержание легкоподвижного фосфора было больше, чем в аналогичном слое слабо- и среднеэродированной почвы примерно в 2.0–2.5 раза. Минимальное его количество обнаружено в почве на границе элювиально-иллювиального горизонтов. Содержание и запасы подвижного и малоподвижного фосфора изменяются по профилю почвы: в верхних слоях гумусового горизонта содержится их значительно меньше, чем в иллювиальном горизонте В1 и В2. Это объясняется непропорциональным образованием минеральных фосфатов в полугидроморфной почве и их потреблением растениями, которое обусловлено специфическими гидротермическими условиями.

Внесение фосфорных удобрений способствует повышению содержания подвижного фосфора, особенно в среднеэродированной почве. В неэродированной почве разница в содержании доступных растениям фосфатов на ранних этапах роста существенная, к укосной спелости она нивелируется. Это отражается на продуктивности луговых трав, на неэродированной почве продуктивность растений от внесения фосфорных удобрений повышается, а на среднеэродированной прибавки иногда не отмечают. Наибольшая урожайность картофеля, яровой пшеницы и луговых трав получается при использовании фосфора в сочетании с азотом и калием на почвах независимо от степени их эродированности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 285 с.
2. *Никитишен В.И.* Эколого-агрохимические основы сбалансированного применения удобрений в адаптивном земледелии. М.: Наука, 2003. 183 с.
3. *Heming S.D.* Phosphorus balances for arable soils in Southern England // Soil Use Manag. 2007. V. 23. № 2. P. 162–170.
4. *Кочергин А.Е.* Эффективность удобрений на черноземах Западной Сибири // Агрохимическая характеристика почв СССР: районы Западной Сибири. М.: Наука, 1968. С. 316–336.
5. *Назарюк В.М.* Почвенно-экологические основы оптимизации питания растений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 364 с.
6. *Антипина Л.П.* Фосфор в почвенном покрове Западной Сибири // Агрохимия. 1988. № 5. С. 20–28.
7. *Берхин Ю.И., Чагина Е.Г., Янцен Е.Д.* Фракционный состав минеральных фосфатов почв Западной Сибири // Агрохимия. 1984. № 9. С. 21–27.
8. *Богданов Н.И.* Почвы и их плодородие. Омск: ОГИЗ, 1952. 44 с.
9. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Роль природных экосистем в восстановлении плодородия выпаханных почв // Пробл. агрохим. и экол. 2017. № 1. С. 43–50.
10. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Фосфатное состояние эродированных лугово-черноземных почв и эффективность фосфорных удобрений в условиях Западной Сибири // Агрохимия. 2019. № 6. С. 3–13.
11. *Якутина О.П.* Изменение фосфатного фонда черноземных почв Западной Сибири под влиянием водной эрозии // Агрохимия. 2006. № 2. С. 16–21.
12. *Назарюк В.М.* Баланс и трансформация азота в агроэкосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 254 с.
13. *Якутина О.П., Назарюк В.М.* Оценка плодородия эродированных почв юга Западной Сибири // Агрохимия. 2007. № 11. С. 10–20.
14. *Гамзиков Г.П., Ильин В.Б., Назарюк В.М.* Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1998. 252 с.
15. *Панфилов В.П., Ландина М.М., Каретин Л.Н.* Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 544 с.
16. *Каштанов А.Н., Явтушенко Е.В.* Агрохимическая характеристика почв склонов. М.: Колос, 1973. 504 с.
17. *Toy T.J., Foster G.R., Renard K.G.* Soil erosion processes: Prediction, measurement, and kontrol. N.Y.: Jonn Wiley and Sons, Inc., 2002. 338 p.
18. *Стрельченко Н.Е.* Фосфатный режим переувлажненных почв Дальнего Востока. Владивосток: Дальневосточн. кн. изд-во, 1982. 143 с.
19. *Назарюк В.М., Кленова М.И., Калимуллина Ф.Р.* Продуктивность и химический состав луговых трав на эродированных почвах лесостепной зоны Западной Сибири // Агрохимия. 2015. № 2. С. 52–63.

Phosphorus Forms in Eroded Meadow-Chernozem Soils of Western Siberia and Their Role in the Mineral Nutrition of Plants

V. M. Nazaryuk[a] and F. R. Kalimullina[a,#]

[a] *Institute of Soil Science and Agrochemistry*
prosp. Akad.. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia
[#] *E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru*

The soil profile showed a significant decrease in the content of organic phosphorus, which is significantly lower in the group of mineral phosphates. As soil erosion increased, the content and reserves of phosphates decreased, especially in the organic group. Changes in the content of mobile forms of phosphorus were also found. In some layers of the humus-accumulative horizon of the non-eroded soil, the content of easily mobile phosphorus was about 2.0–2.5 times higher than in the eroded soil. The content and reserves of mobile and inactive phosphorus in the humus-accumulative horizon were significantly lower than in the illuvial horizons B1 and B2. This is due to the disproportionate formation of mineral phosphates in the soil and their consumption by plants during the growing season, which is due to the specific hydrothermal conditions of the environment. Application of phosphorous fertilizers increased the content of mobile phosphorus in the soil by 22–33% and plant productivity by 19–37%.

Key words: eroded soil, humus, forms of phosphorus, fertilizer, plant.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 21–30

Плодородие почв

УДК 631.811.1:633.262:631.862

БАЛАНС АЗОТА, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АГРОЦЕНОЗАХ С БЕССМЕННЫМ ВОЗДЕЛЫВАНИЕМ КОСТРЕЦА БЕЗОСТОГО ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ БЕСПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА

© 2021 г. С. И. Тарасов[1,*], М. Е. Кравченко[1], Т. А. Бужина[1]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа – филиал Верхневолжского федерального аграрного научного центра
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, п. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия
**E-mail: tarasov.s.i@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.05.2020 г.
После доработки 15.07.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

В стационарном опыте Географической сети по комплексному применению удобрений на дерново-подзолистой супесчаной почве определены баланс азота, изменения коэффициентов использования биогенных элементов кострецом безостым при длительном (1983–2019 гг.) использовании минеральных удобрений и различных доз бесподстилочного навоза. Отмечено снижение использования азота, фосфора, калия из жидкого навоза, животноводческих стоков с увеличением доз данных удобрений, длительности их применения. Обоснована необходимость учета уровня плодородия почв при расчете оптимальных доз внесения бесподстилочного навоза.

Ключевые слова: дерново-подзолистая супесчаная почва, бесподстилочный навоз, длительное применение, плодородие, кострец безостый, урожайность, качество, баланс азота, коэффициенты использования биогенных элементов.

DOI: 10.31857/S0002188121020125

ВВЕДЕНИЕ

В хозяйствах индустриального животноводства бесподстилочный навоз применяется преимущественно под многолетние злаковые травы, злаково-бобовые травосмеси. Согласно методическим рекомендациям [1], при расчете годовой оптимальной дозы бесподстилочного навоза учитывают вынос элементов питания планируемым урожаем, их содержание в применяемом удобрении и коэффициенты использования азота, фосфора, калия из него. При расчетах применяют следующие коэффициенты использования биогенных элементов из бесподстилочного навоза: азота – 0.5, фосфора – 0.3, калия – 0.7 при богаре и 0.8 – при орошении. Данные коэффициенты установлены на основании результатов исследований с использованием меченых атомов. Согласно краткосрочным исследованиям [2] с применением стабильного изотопа азота ^{15}N, 40–50% азота удобрений используют растения, 20–25% закрепляется в почве в основном в органической форме микроорганизмами, 25–30% составляют газообразные потери за счет деятельности денитрифицирующих бактерий. В исследованиях немецких ученых коэффициенты использования элементов питания из бесподстилочного навоза не представляют собой постоянных величин и их величины зависят от почвенно-климатических особенностей зон его использования, сроков внесения и варьируют в следующих пределах: для азота – 0.4–0.7, фосфора – 0.3–0.9, калия – 0.6–0.85 [3]. Значительно меньшие коэффициенты использования биогенных элементов из бесподстилочного навоза приведены в нормативах ВИУА, согласно которым коэффициенты использования азота, фосфора, калия из жидкого навоза составляют соответственно 0.3, 0.25, 0.3, из полужидкого навоза – соответственно 0.35, 0.35, 0.35 [4]. Приведенные величины эффективности использования сельскохозяйственными культурами биогенных элементов из бесподстилочного навоза получены, как правило, в краткосрочных полевых исследованиях. Однако для современных хозяйств индустриального животноводства при расчетах оптимальных доз удобрений под сельскохозяйственные культуры чрезвычайно

важны сведения о коэффициентах использования азота, фосфора, калия из жидкого навоза, помета, животноводческих стоков при длительном их применении. Цель работы – определение эффективности длительного применения различных доз бесподстилочного навоза в агроценозе с бессменным посевом костреца безостого, величин коэффициентов использования биогенных элементов из удобрения, баланса азота, статей его расхода в зависимости от уровня плодородия почвы, длительности проведения исследования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование эффективности длительного применения различных доз бесподстилочного навоза в агроценозах с бессменным возделыванием костреца безостого проводят на опытном ВНИИОУ с 1983 г. в рамках программы длительных опытов Географической сети по комплексному применению удобрений и других средств химизации (регистрационный № 088 в Реестре аттестатов длительных опытов). Почва участка – дерново-сильно подзолистая супесчаная, подстилаемая моренным суглинком. Пахотный слой почвы перед закладкой опыта имел следующие агрохимические показатели: pH_{KCl} 4.9, содержание гумуса (по Тюрину) – 1.34%, подвижных фосфора и калия (по Кирсанову) – соответственно 56–68 и 147 мг/кг, $H_г$ (по Каппену) – 1.9 ммольэкв/100 г, сумма поглощенных оснований (по Каппену–Гильковицу) – 3.7 ммольэкв/100 г. Схема полевого опыта включала следующие варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – бесподстилочный навоз (**БН**), доза N300, используют под 3 укоса в дозах по укосам: N300 + 0 + 0, 3 – БН, N400 (300 + 100 + 0), 4 – БН, N500 (300 + 100 + + 100), 5 – БН, N700 (300+200+200), 6 – минеральные удобрения (**МУ**), эквивалент варианта 2 по содержанию N300PK. Удобрения вносили ежегодно – БН 3 раза в год (по укосам), МУ – один раз в год весной вразброс без заделки. В исследованиях 1983–1994 гг. применяли бесподстилочный навоз свинокомплекса "Владимирский" со следующими агрохимическими характеристиками: влажность 97.88–98.73%, валовое содержание азота – 0.06–0.1, фосфора – 0.02–0.03, калия – 0.02–0.04%. На комплексе использовали гидросмывную систему удаления и транспортирования навоза. Начиная с 1995 г., в полевых исследованиях применяли бесподстилочный навоз крупного рогатого скота – смесь полужидкого навоза молодняка 12–18 мес. (механическое удаление с помощью дельта-скреперов) и навозных стоков (доильно-молочного блока, после очистки животноводческих ферм) со следующими агрохимическими характеристиками: влажность 95–97%, валовое содержание азота – 0.09–0.15, фосфора – 0.03–0.05, калия – 0.07–0.12. Площадь опытной делянки 70 м^2, учетной – 54 м^2. Повторность четырехкратная. Опытная культура – кострец безостый (*Bromopsis inermis* Leyss..), сорт Моршанский 760. Агротехника – общепринятая для Владимирской обл. [5]. В период 1983–1994 гг. на удобрение использовали бесподстилочный навоз свинокомплекса "Владимирский". Начиная с 1995 г., по причинам экономического характера (высокие транспортные расходы), в опыте использовали бесподстилочный навоз КРС местной молочной фермы и молочного комплекса ЗАО "Имени Ленина" Собинского р-на Владимирской обл. Использованный в период 1983–2018 гг. на удобрение бесподстилочный навоз характеризовался низким содержанием сухого вещества (1.6–4.6%), азота (0.11–0.21%), фосфора (0.06–0.1%), калия (0.12–0.23%). Выбор опытного участка, закладку, проведение полевого опыта, учет урожая костреца безостого выполняли в соответствии с требованиями ОСТ 10 106 [6], "Методики полевого опыта" [7]. Учет и качество урожая фитомассы каждой делянки проводили не позднее начала колошения методом сплошного укоса. Отбор, подготовку к анализу, ботанический состав проб зеленой массы, ее качество определяли по показателям и методами, указанными в ГОСТ Р 56912. Содержание органического вещества в почве определяли по методу Тюрина [8], групповой и фракционный состав гумуса – методом Тюрина в модификации Пономаревой–Плотниковой [9], подвижный гумус – экстракцией органического вещества почвы 0.1 н. NaOH [10], водорастворимый гумус – методом Тюрина [11]. Критерием использования растениями элементов питания являлась величина соотношения разности между выносом питательных веществ растениями на удобренном и контрольном вариантах к дозе внесенного в почву действующего вещества: Киу = = (Ву – Во)/Д × 100%, где Киу – коэффициент использования питательных веществ удобрений, %; Ву – величина выноса питательного элемента в удобренном варианте, кг/га; Во – вынос в контрольном варианте, кг/га; Д – доза удобрения, кг д.в./га. Математическая обработка экспериментальных данных проведена методом дисперсионного анализа [7], построение рисунков-гистограмм – с использованием компьютерных программ Excel.

Таблица 1. Динамика изменения содержания гумуса в почве (слой 0–20 см) при систематическом применении удобрений по годам наблюдений

Вариант	Год отбора и анализа образцов почвы							
	1983	1988	1993	1998	2003	2007	2012	2019
	Содержание гумуса, %							
Контроль без удобрений	1.34 ± 0.1	1.43 ± 0.06	1.55 ± 0.04	1.64 ± 0.09	1.76 ± 0.1	1.76 ± 0.06	1.79 ± 0.08	2.02 ± 0.1
БН, N300	1.34 ± 0.1	1.74 ± 0.11	2.22 ± 0.1	2.72 ± 0.08	3.22 ± 0.06	3.31 ± 0.1	3.34 ± 0.1	3.23 ± 0.08
БН, N400	1.34 ± 0.1	1.83 ± 0.06	2.29 ± 0.05	2.76 ± 0.1	3.24 ± 0.08	3.33 ± 0.1	3.36 ± 0.12	3.53 ± 0.08
БН, N500	1.34 ± 0.1	1.83 ± 0.1	2.31 ± 0.06	2.81 ± 0.04	3.29 ± 0.08	3.33 ± 0.1	3.41 ± 0.1	3.84 ± 0.06
БН, N700	1.34 ± 0.1	–	–	3.00 ± 0.06	3.55 ± 0.08	3.60 ± 0.06	3.65 ± 0.1	4.00 ± 0.09
МУ, N300PK	1.34 ± 0.1	1.57 ± 0.1	1.79 ± 0.08	2.03 ± 0.06	2.26 ± 0.06	2.26 ± 0.05	2.31 ± 0.07	2.52 ± 0.08

Примечание. БН – бесподстилочный навоз, МУ – минеральные удобрения. То же в табл. 3–8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Регулярное применение удобрений обусловило заметное изменение содержания органического вещества в почве, увеличение урожайности костреца безостого. Применение бесподстилочного навоза ежегодно повышало содержание гумуса в дерново-подзолистой супесчаной почве при дозах N300, N700 соответственно на 0.05 и 0.07%, что свидетельствовало о повышении потенциального плодородия почв (табл. 1). За период исследования 1983–2019 гг. в вариантах опыта с внесением бесподстилочного навоза в дозах N300, N700 в почву поступило органического вещества в составе пожнивно-корневых остатков и навоза соответственно 520 и 928 т/га. Коэффициенты минерализации поступившего органического вещества в почве данных вариантов опыта составили соответственно 88 и 91%. При использовании бесподстилочного навоза содержание гумуса повышалось как в пахотном, так и в нижележащих горизонтах почвы (табл. 2). Максимальной дозе бесподстилочного навоза (N700) соответствовало наибольшее увеличение содержания органического вещества в нижележащих горизонтах, что было обусловлено миграцией подвижных органических веществ из верхнего перегнойно-аккумулятивного горизонта, ростом биомассы корневой системы трав. Длительное, ежегодное применение бесподстилочного навоза повысило качество органического вещества почвы: увеличило абсолютное содержание в ней гуминовых и фульвокислот. В результате заметного увеличения содержания углерода гуминовых кислот в вариантах с применением бесподстилочного навоза тип гумуса трансформировался из фульватного в гуматно-фульватный. Регулярное применение бесподстилочного навоза повысило качество гуминовых кислот: увеличило содержание наиболее ценных гуминовых кислот, связанных с кальцием и полуторными окислами (фракции ГК-2, ГК-3). Систематическое применение бесподстилочного навоза увеличило содержание в почве водорастворимых и лабильных гумусовых соединений, тем самым повысило ее эффективное плодородие [12]. В почве варианта с использованием бесподстилочного навоза в дозе N700 в сравнении с почвой контрольного варианта доля запасов водорастворимых форм органического вещества увеличилась в 1.5 раза (6.5 против 4.1% $C_{общ}$), содержание лабильного гумуса –в 2 раза (303 против 162 мг С/100 г).

Длительное применение бесподстилочного навоза оказало заметное влияние на изменение агрохимических свойств почвы: отмечено заметное увеличение содержания в ней общего азота, подвижного фосфора, калия (табл. 3). С увеличением дозы бесподстилочного навоза содержание этих элементов в почве повышалось. Увеличение содержания биогенных элементов отмечено как в пахотном, так и в нижележащих горизонтах почвы. Отсутствие гигиенических нормативов не позволило оценить безопасность почвы с содержанием фосфатов >700, калия >400 мг/кг. Указанные в ГН 2.1.7.2041 [13] ПДК фосфатов (200 мг/кг) и ПДК калия (360 мг/кг) разработаны для ограничения содержания в почве суперфосфата и хлорида калия. Высокое накопление биогенных элементов в пахотном горизонте почвы обусловило их активную миграцию по профилю почвы, что повышало риски загрязнения грунтовых вод прежде всего нитратами, фосфатами.

Согласно результатам исследования, экологическая устойчивость костреца безостого зависела от уровня плодородия почвы. Многолетнее ис-

Таблица 2. Влияние регулярного применения удобрений на содержание гумуса в различных горизонтах почвы (2019 г.), %

Горизонт, см	Варианты			
	Контроль (без удобрений)	Бесподстилочный навоз		Минеральные удобрения N300PK
		N300	N700	
0–20	2.02 ± 0.1	3.23 ± 0.08	4.00 ± 0.09	2.52 ± 0.08
20–40	0.6 ± 0.08	0.82 ± 0.12	0.94 ± 0.11	0.56 ± 0.1
40–60	0.24 ± 0.06	0.52 ± 0.08	0.81 ± 0.1	0.32 ± 0.06
60–80	0.24 ± 0.08	0.36 ± 0.1	0.4 ± 0.08	0.26 ± 0.08
80–100	0.21 ± 0.11	0.34 ± 0.1	0.42 ± 0.12	0.22 ± 0.06

Таблица 3. Влияние удобрений на содержание биогенных элементов в дерново-подзолистой почве (май 2019 г.)

Вариант	Горизонт, см	P_2O_5	K_2O	$N_{общ}$, %
		мг/кг		
Контроль	0–20	35 ± 2.8	97 ± 4	0.13 ± 0.01
	20–40	13 ± 1.1	41 ± 3	0.10 ± 0.01
БН, N300	0–20	718 ± 13	345 ± 17	0.28 ± 0.03
	20–40	394 ± 6	281 ± 10	0.13 ± 0.01
БН, N400	0–20	986 ± 16	400 ± 18	0.32 ± 0.02
	20–40	690 ± 11	368 ± 12	0.09 ± 0.01
БН, N500	0–20	1330 ± 19	419 ± 17	0.33 ± 0.02
	20–40	740 ± 12	375 ± 14	0.12 ± 0.01
БН, N700	0–20	1430 ± 24	430 ± 15	0.34 ± 0.03
	20–40	912 ± 15	373 ± 14	0.11 ± 0.01
МУ, N300PK	0–20	754 ± 12	306 ± 12	0.15 ± 0.02
	20–40	291 ± 7	161 ± 8	0.09 ± 0.01

Таблица 4. Влияние удобрений на долю костреца безостого в травостое

Вариант	Доля костреца безостого в травостое по годам, %									
	1987	1992	1997	2002	2007	2013	2014	2015	2016	2019
1. Контроль	50	15	11	2	1	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3
2. БН, N300	84	71	56	59	97	98	94	94	92	92
3. БН, N400	84	76	64	62	97	97	94	96	94	93
4. БН, N500	82	79	65	61	99	96	95	95	95	94
5. БН, N700	82	79	78	78	85	99	97	97	96	97
6. МУ, N300PK	76	64	48	56	84	96	94	96	95	94

пользование травостоя костреца безостого в варианте без удобрений приводило к сукцессии. Агроценоз заменился фитоценозом (табл. 4). В первые 5 лет доля костреца в травостое снижалась до 84%, через 10 лет – до 15, через 37 лет – до 0.3. В травостое отсутствовала доминирующая культура. В его составе было более 20 биологически сильно отличающихся видов растений.

Совершенно иные результаты получены в вариантах с регулярным применением удобрений. В первые годы исследования в данных вариантах также отмечено снижение доли в травостое костреца безостого, что, вероятно, было связано с выпадением наименее устойчивых растений в условиях низкого плодородия почвы. Однако по мере повышения плодородия почвы проявились виолентные

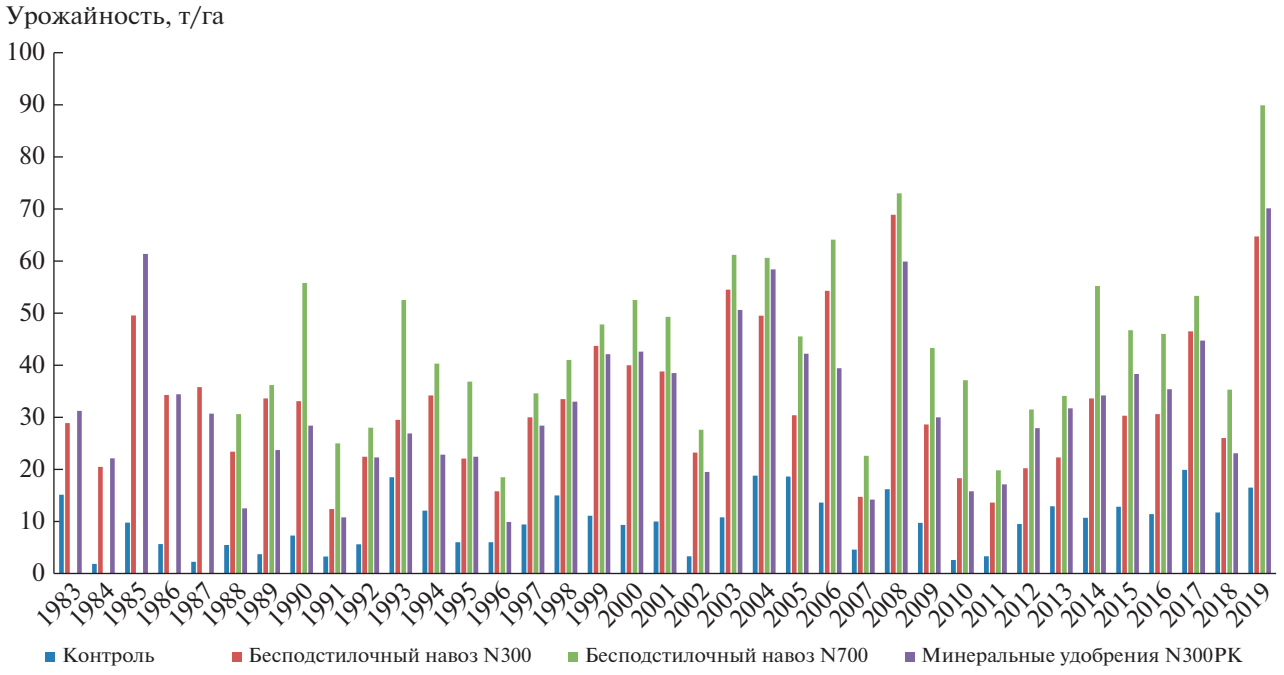

Рис. 1. Влияние удобрений на урожайность костреца безостого, т/га (в пересчете на сухое вещество, средние, $НСР_{05}$ = = 0.6 т/га).

свойства костреца базостого (более раннее наступление фазы активного формирования надземной вегетативной массы, корневой системы, опережающий линейный рост растений). На протяжении всех последующих лет исследования (2007–2019 гг.) доминирующее положение в травостое в этих вариантах опыта занимал кострец безостый. Положительное влияние бесподстилочного навоза на высокую степень участия культурных видов многолетних трав в травостоях показано в многочисленных краткосрочных исследованиях [14–16]. Подавляющее преобладание нитрофильных многолетних злаковых трав в агроценозах авторы объясняли высоким уровнем их обеспеченности азотом в условиях интенсивного применения жидкого навоза, навозных стоков.

Согласно результатам исследования, урожайность зеленой массы травостоя различалась по годам и не зависела от их возраста, определялась дозой примененных удобрений, погодными условиями вегетационных периодов. Наибольшая урожайность зеленой массы костреца безостого получена в 2019 г., в 37 год проведения исследования благодаря умеренному температурному режиму, интенсивному выпадению осадков на протяжении всего вегетационного периода. На протяжении всех лет исследования урожайность зеленой массы повышалась с увеличением доз бесподстилочного навоза (рис. 1).

В сравнении с контрольным вариантом опыта применение бесподстилочного навоза в дозах N300–N700 повышало урожайность в среднем соответственно на 300–500%. Применение бесподстилочного навоза и минеральных удобрений в дозах, эквивалентных по содержанию основных биогенных элементов питания, обеспечило одинаковое увеличение урожая зеленой массы костреца. Согласно литературным данным, высокая продуктивность многолетних трав при использовании бесподстилочного навоза, вероятно, была обусловлена их биологическими особенностями. Многолетние злаковые травы обладают мощной корневой системой, проникающей на глубину более 2 м и высокой их способностью к отрастанию за счет надземных и видоизмененных подземных побегов. Развитая мочковатая корневая система способствует более полному усвоению питательных веществ, внесенных с удобрениями, надежно обеспечивает растения физиологически активными веществами, стимулирующими рост, развитие растений, их высокую продуктивность, устойчивость к стрессовым условиям произрастания [16].

Результаты 37-летнего исследования показали, что качество зеленой массы костреца безостого при регулярном применении удобрений опре-

Таблица 5. Влияние регулярного применения удобрений на качество зеленой массы трав в агроценозах с бессменным возделыванием многолетних трав (2019 г.)

Содержание, % в сухом веществе	Варианты						HCP_{05}
	Контроль	Бесподстилочный навоз				МУ, N300PK	
		N300	N400	N500	N700		
Сырая зола	2.4	2.51	2.56	2.59	2.62	2.44	0.42
Зола, нерастворимая в HCl	0.14	0.22	0.26	0.3	0.38	0.25	0.04
Сырой протеин	11.9	15.2	15.6	15.6	16.8	15.4	1.5
Переваримый протеин	7.41	9.88	10.1	10.1	10.9	10.0	0.96
Сырой жир	3.0	3.4	3.4	3.8	4.2	3.2	0.58
БЭВ	11.4	9.51	9.67	9.33	8.82	9.84	0.65
Сырая клетчатка	27.0	25.6	25.0	24.6	24.4	26.0	1.0
Водорастворимые углеводы	7.5	7.1	6.6	6.3	5.8	7.0	1.12
Сахаро-протеиновое соотношение	1.01	0.72	0.65	0.62	0.53	0.7	0.12
Каротин, мг/кг	66.2	80.6	102	134	155	80.6	22.3
Обменная энергия, МДж/кг	10.14	10.39	10.5	10.57	10.61	10.32	0.4
Кормовые единицы/1 кг	0.83	0.87	0.89	0.9	0.91	0.86	0.06
Нитраты, мг/кг сырого вещества	56	288	304	526	544	318	84.7
Стойкие хлорорганические пестициды	Не обнаружены						

делялось прежде всего величиной дозы удобрений, уровнем плодородия почв, погодными условиями вегетационного периода, не зависело от возраста травостоя. Регулярное применение бесподстилочного навоза в дозах, не превышающих N300, повысило в зеленой массе многолетних трав содержание общего азота, сырого протеина, каротина, жира, снизило количество сырой клетчатки, водорастворимых углеводов (табл. 5). Увеличение дозы жидкого навоза, навозных стоков с N300 до N700 во все годы исследования повышало сбор сырого протеина в сравнении с контролем соответственно в 5 и 7 раз, сбор кормовых единиц с 1 га возрастал в 4–5 раза. На протяжении всех лет исследования применение бесподстилочного навоза повышало в зеленой массе костреца содержание калия, фосфора, уменьшало – кальция, магния (табл. 6). Снижение содержания в зеленой массе кальция и магния под влиянием удобрения было обусловлено более высоким содержанием в жидком навозе, навозных стоках азота и калия, являющихся элементами-антогонистами для кальция, калия – для магния. Изменение содержания макроэлементов в растениях костреца при использовании высоких доз удобрений (N500 и более) приводило к опасному нарушению их соотношений: K : (Ca + Mg) > 2.2, K : : Na >4.5, а также Ca : P = (1–3) : 1 в сторону трехкратного превышения содержания фосфора над количеством кальция, что снижало качество зеленой массы, безопасность ее применения на корм [17]. Важным показателем сбалансированности кормов минеральными веществами является соотношение суммы грамм-эквивалентов кислотных элементов к сумме грамм-эквивалентов щелочных элементов. Наиболее благоприятным соотношением считается (0.6–1.0) : 1. Систематическое применение бесподстилочного навоза в дозе N700, минеральных удобрений повышало данное соотношение до критических величин. Вследствие использования бесподстилочного навоза в сверхвысоких дозах (N500 и более) в зеленой массе костреца отмечено сверхнормативное накопление нитратов, нарушение сахаро-протеинового отношения, что ухудшало кормовую ценность зеленой массы, безопасность ее использования.

Регулярное применение различных доз бесподстилочного навоза не оказало заметного влияния на содержание в зеленой массе костреца токсичных веществ (тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов), что было связано с их чрезвычайно низким содержанием в бесподстилочном навозе.

Таблица 6. Влияние регулярного применения удобрений на минеральный состав зеленой массы трав в агроценозах с бессменным возделыванием многолетних трав (анализ урожая 2019 г.)

Показатель качества, содержание, % в сухом веществе	Варианты						$НСР_{05}$
	Контроль	Бесподстилочный навоз				МУ, N300PK	
		N300	N400	N500	N700		
Азот общий	1.71	2.46	2.53	2.58	2.66	2.43	0.16
Фосфор общий	0.78	0.96	1.16	1.2	1.26	1.04	0.11
Калий общий	1.66	1.94	2.18	2.46	2.68	1.86	0.35
Кальций	0.54	0.5	0.5	0.46	0.42	0.48	0.06
Магний	0.62	0.56	0.58	0.52	0.5	0.54	0.05
Сера	1.5	1.8	2.1	2.4	2.6	2.0	0.38
Хлор	0.6	0.9	1.1	1.3	1.4	1.1	0.20
Натрий	0.56	0.64	0.64	0.68	0.7	0.62	0.11
Соотношение Ca : P	0.7 : 1	0.5 : 1	0.4 : 1	0.4 : 1	0.3 : 1	0.466	
Соотношение K : Na	2.96 : 1	3.0 : 1	3.4 : 1	3.6 : 1	3.8 : 1	3.0 : 1	
Соотношение K : (Ca + Mg)	1.43	1.83	2.0	2.51	2.91	1.82	
Соотношение суммы кислотных и суммы щелочных грамм-эквивалентов	1.1 : 1	1.3 : 1	1.5 : 1	1.7 : 1	1.8 : 1	1.6 : 1	

стилочном навозе. Высокое качество зеленой массы костреца при применении бесподстилочного навоза в дозах, не превышающих N300, на протяжении всех лет его бессменного пользования, вероятно, было обусловлено значительным уровнем плодородия почв, биологическими особенностями данного растения. Кострец безостый относится к группе поликарпических растений. На протяжении всего периода вегетации данные растения характеризуются высоким уровнем возобновления травостоя: постоянно появляются в большом количестве новые побеги, которые при применении умеренных доз удобрений не накапливают питательные вещества в опасных концентрациях.

Согласно результатам исследования, длительное применение различных доз бесподстилочного навоза оказало значительное влияние на рост плодородия почв, урожайность, качество зеленой массы костреца безостого. За прошедшие 37 лет систематического применения с бесподстилочным навозом в почву в расчете на 1 га было внесено при применении дозы N300: 11.1 т азота, 3.6 т P_2O_5, 7.2 т K_2O; при внесении максимальной дозы N700: 25.9 т азота, 8.4 т P_2O_5, 17.2 т K_2O. При выносе урожаем многолетних трав с 1 га хозяйственный баланс элементов питания во всех вариантах с использованием удобрений складывался положительно, что обусловило значительное изменение агрохимических показателей плодородия почвы. При внесении бесподстилочного навоза и минеральных удобрений отмечено увеличение содержания гумуса и основных элементов питания в почве. С увеличением длительности проведения исследования, с повышением дозы внесения бесподстилочного навоза, а также увеличения плодородия почв коэффициенты использования кострецом безостым биогенных элементов заметно снижались. Например, в период 1983–1990 гг. коэффициенты использования NPK кострецом из бесподстилочного навоза при дозе внесения N300 составляли соответственно: 0.5, 0.7, 0.7. За весь период исследования (1983–2019 гг.) они снизились соответственно до 0.29, 0.35, 0.46. Коэффициенты использования NPK кострецом из бесподстилочного навоза при дозе внесения N700 в 1983–1990 гг. соответствовали 0.45, 0.3, 0.6, за период 1983–2019 гг. составили лишь 0.18, 0.21, 0.28 (табл. 7).

По результатам проведенных исследований расчитан баланс азота при длительном применении удобрений в агроценозах с бессменным возделыванием костреца безостого (табл. 8). С увеличением дозы бесподстилочного навоза с N300 до N700 повышались непроизводительные потери азота с 18 до 51%, что снижало агрономическую ценность данного удобрения, повышало риски загрязнения окружающей среды и растительной продукции [18–22].

Таблица 7. Использование основных элементов питания многолетними травами (1983–2019 гг.)

Вариант	Урожайность зеленой массы, т/га	Внесено с удобрениями основных элементов питания, кг/га				Вынос основных элементов питания урожаем, кг/га				Коэффициент использования основных элементов питания		
		N	P_2O_5	K_2O	NPK	N	P_2O_5	K_2O	NPK	N	P_2O_5	K_2O
Контроль	366	–	–	–	–	1311	531	1348	3190			
БН, N300	1219	11100	3627	7337	22064	3223	1265	3361	7869	29	35	46
БН, N400	1350	14800	4903	9882	29585	3648	1475	3673	8796	25	30	37
БН, N500	1477	18500	6179	12427	37106	4229	1732	4356	10317	23	23	35
БН, N700	1604	25900	8730	17518	52148	4635	1868	4916	11419	18	21	28
МУ, N300PK	1191	11100	3627	7337	22064	3167	1229	3115	7511	29	34	42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регулярное применение бесподстилочного навоза в агроценозе с бессменным 37-летним возделыванием костреца безостого определило ежегодное увеличение содержания гумуса в дерново-подзолистой супесчаной почве при дозах N300, N700 соответственно на 0.05 и 0.07%, что свидетельствовало о повышении потенциального плодородия почв. Систематическое применение бесподстилочного навоза в дозе N700 увеличило содержание в почве водорастворимых и лабильных гумусовых соединений соответственно в 1.5 и 2.0 раза в сравнении с их содержанием в почве контрольного варианта, повысило ее эффективное плодородие.

Длительное применение бесподстилочного навоза увеличило содержание в почве азота, подвижного фосфора и калия. При увеличении дозы бесподстилочного навоза до N700 содержание подвижного фосфора, калия в почве повышалось до возможно критических величин – соответственно до 1429 и 430 мг/кг.

Бессменное возделывание костреца безостого в условиях дерново-подзолистой почвы без применения удобрений обусловило его динамичное выпадение в травостое уже в первые годы произрастания. В первые 5 лет содержание костреца в травостое снижалось до 84, через 10 лет – до 15, через 37 лет – до 0.3%. Доминирующими становились травосмеси сорных растений, наиболее приспособленные к условиям произрастания. Регулярное применение бесподстилочного навоза в агроценозах с бессменным возделыванием костреца безостого способствовало его подавляющему преобладанию в травостое. В 2019 г., на 37-м году возделывания во всех вариантах опыта с применением различных доз бесподстилочного навоза доля костреца безостого в травостое превышала 92%.

За весь период исследования применение бесподстилочного навоза в дозах N300–N700 в среднем повышало урожайность костреца безостого соответственно в 3–5 раз. Высокопродуктивное долголетие костреца безостого в условиях регулярного, интенсивного применения бесподстилочного навоза на протяжении более 37 лет исследования не зависело от возраста травостоя, определялось дозой удобрений, уровнем плодородия почвы, погодными условиями вегетационного периода. Наибольшая урожайность костреца безостого была получена в 2019 г, на 37-м году его возделывания, в условиях наиболее благоприятных для роста и развития многолетних злаковых трав.

Регулярное применение бесподстилочного навоза оказало положительное влияние на качество костреца безостого. С увеличением дозы бесподстилочного навоза в агроценозе с бессменным возделыванием костреца безостого определило ежегодное увеличение содержания гумуса в дерново-подзолистой супесчаной почве при дозах N300, N700 соответственно на 0.05 и 0.07%, что свидетельствовало о повышении потенциального плодородия почв. Систематическое применение бесподстилочного навоза в дозе N700 увеличило содержание в почве водорастворимых и лабильных гумусовых соединений соответственно в 1.5 и 2.0 раза в сравнении с их содержанием в почве контрольного варианта, повысило ее эффективное плодородие.

Длительное применение бесподстилочного навоза увеличило содержание в почве азота, подвижного фосфора и калия. При увеличении дозы бесподстилочного навоза до N700 содержание подвижного фосфора, калия в почве повышалось

Таблица 8. Баланс азота при длительном использовании (1983–2019 гг.) минеральных удобрений, различных доз бесподстилочного навоза в агроценозе с бессменным возделыванием костреца безостого (*Bromopsis inermis* Leyss.)

Вариант	Внесено азота	Вынос азота урожаем	Закреплено почвой	Потери
БН, N300	11.1 / 100	3.22 / 29	3.89 / 35	3.99 / 36
БН, N700	25.9 / 100	4.64 / 18	5.47 / 21	15.8 / 61
МУ, N300PK	11.1 / 100	3.2 / 29	2.43 / 22	5.47 / 49

Примечание. Над чертой – т, под чертой – % от внесенного.

стилочного навоза в зеленой массе повышалось содержание сырого протеина, каротина, жира, количество обменной энергии, кормовых единиц.

Увеличение дозы бесподстилочного навоза с N300 до N700 во все годы исследования повышало сбор сырого протеина в сравнении с контролем соответственно в 5 и 7 раз, сбор кормовых единиц с 1 га возрастал в 4–5 раза. В условиях регулярного применения бесподстилочного навоза качество зеленой массы костреца безостого не зависело от возраста травостоя, определялось прежде всего дозой удобрений, уровнем плодородия почвы, погодными условиями вегетационного периода.

Основным ограничением систематического применения бесподстилочного навоза в дозах, превышающих N500, было его негативное влияние на качество зеленой массы костреца безостого вследствие опасного накопления в ней нитратов (>500 мг/кг сырой массы), снижения содержания безазотистых экстрактивных веществ, водорастворимых углеводов, переваримого белка, нарушения сахаро-протеинового соотношения (0.53 при дозе N700 против оптимальной его величины (0.8–1.5) : 1) и соотношения макроэлементов: K : (Ca + Mg) >2.2, K : Na >4.5, Ca : P = = (1–3) : 1.

С увеличением сроков внесения и доз применения бесподстилочного навоза, а также с повышением плодородия почв коэффициенты использования кострецом безостым биогенных элементов из удобрений заметно снижались, что обусловливало необходимость при расчетах оптимальных доз их внесения учитывать уровень плодородия почв. В период 1983–1990 гг. коэффициенты использования NPK кострецом из бесподстилочного навоза при дозе внесения N300 составляли соответственно 0.5, 0.37, 0.7. За весь период исследования (1983–2019 гг.) они снизились соответственно до 0.29, 0.35, 0.46. Коэффициенты использования NPK кострецом из бесподстилочного навоза при дозе внесения N700 в 1983–1990 гг. соответствовали 0.45, 0.3, 0.6, за период 1983–2019 гг. составили лишь 0.18, 0.21, 0.28.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мерзлая Г.Е., Полунин С.Ф., Васильев В.А.* Дозы и сроки внесения бесподстилочного навоза: Метод. рекоменд. М.: ВАСХНИЛ, ВИУА, 1990. 24 с.
2. *Минеев В.Г., Ремпе Е.Х.* Агрохимия, биология и экология почвы. М.: Росагопромиздат, 1990. 206 с.
3. *Семенов П.Я.* Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения. М.: Колос, 1978. 271 с.
4. Нормативные показатели содержания азота, фосфора и калия в органических удобрениях и использования их сельскохозяйственными культурами (1991–1995 гг.) М.: ВИУА, 1991. 56 с.
5. *Автонеев К.И.* Система ведения сельского хозяйства Владимирской области. Владимир: Отд-е ВАСХНИЛ по НЗ РСФСР, 1985. 344 с.
6. Опыты полевые. Порядок проведения. ОСТ 10 106-87. М.: Госагропром СССР, 1988. 48 с.
7. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
8. Почвы. Методы определения органического вещества. ГОСТ 26213-91. М.: Изд-во стандартов, 1992. 6 с.
9. *Мартынова Н.А.* Химия почв: органическое вещество почв: учеб.-метод. пособ.Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 255 с.
10. *Минеев В.Г.* Практикум по агрохимии. Учеб. Пособ. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
11. *Мамонтов В.Г.* Практикум по химии почв. М.: РГАУ–МСХА, 2014. 283 с.
12. *Тарасов С.И., Кравченко М.Е., Бужина Т.А.* Эффективность длительного применения бесподстилочного навоза в агроценозах с бессменным возделыванием костреца безостого. 4. Влияние регулярного применения бесподстилочного навоза на органическое вещество дерново-подзолистой почвы в агроценозах с бессменным возделыванием многолетних трав // Плодородие. 2017. № 1. С. 51–53
13. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.7.2041-2006. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
14. *Тарасов С.И., Кравченко М.Е., Бужина Т.А.* Эффективность длительного применения бесподстилочного навоза в агроценозах с бессменным возделыванием костреца безостого. 1. Влияние длительного применения бесподстилочного навоза на ботанический состав и урожай костреца безостого // Плодородие. 2015. № 6. С. 27–30.
15. *Мерзлая Г.Е., Новиков М.Н., Еськов А.И., Тарасов С.И.* Агроэкологические основы и технологии использования бесподстилочного навоза. М.: РАСХН, ВНИПТИОУ, 2006. 463 с.
16. *Андреев Н.Г., Савицкая В.А.* Кострец безостый. М.: Агропромиздат, 1988. 184 с.
17. Методические указания по разработке проектно-технической документации по рациональному использованию кормов. М.: Минсельхозпрод России, 1999. 50 с.
18. Свод правил экологически безопасной сельскохозяйственной практики в условиях Ленинградской области России. Ч 1. Содержание крупного рогатого скота и кормопроизводство. Изд-е 2-е. СПб.–Хельсинки, 2007. 70 с.
19. *Соловиченко В.Д., Никитин В.В., Карабутов А.П.* Влияние агротехнических факторов на показатели нитрифицирующей способности чернозема типичного // Агрохим. вестн. 2018. № 3. С. 32–34.
20. *Баиров А.Ж., Нуриддинова Х.Т., Жураев Ш.А.* Изменения запасов азота почвы и его форм под влияни-

ем минеральных и органических удобрений // Агрохим. вестн. 2018. № 5. С. 15–18.

21. *Никифорова А.М., Фаизова В.И., Лысенко В.Я.* Оценка сезонной динамики численности аммонификаторов на черноземах при сельскохозяйственном использовании // Агрохим. вестн. 2017. № 4. С. 42–46.
22. *Кудеяров В.Н.* Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15.

Effect of Prolonged Application of Different Doses of Liquid Manure on Nitrogen Balance, the Use of Nutrients in Agricultural Lands with Permanent Cultivation of Awnless Brome (*Bromopsis inermis* Leyss.)

S. I. Tarasov[a,#], M. E. Kravchenko[a], and T. A. Buzhina[a]

[a] *All-Russian Scientific Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – a Branch of the Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Centre ul. Pryanishnikova 2, Vladimir region, Sudogodsky district, p. Vyatkino 601390, Russia*

[#] *E-mail: tarasov.s.i@mail.ru*

In stationary experience of the geographical network for the integrated application of fertilizers on sod-podzolic sandy loam soil determined by nitrogen balance, the change of the coefficients used in litvania nutrients by awnless brome (*Bromopsis inermis* Leyss.) under long-term (1983–2019 years) application of mineral fertilizer, different doses of liquid manure. There was a decrease in the use of nitrogen, phosphorus, potassium from liquid manure, animal waste with increasing doses of application and duration of their application. The necessity of accounting for the fertility of the soil when calculating the optimal doses of making liquid manure.

Key words: awnless brome (*Bromopsis inermis* Leyss.), liquid manure, long-term use, sod-podzolic sandy loam soil, fertility, yield, quality, nitrogen balance, nutrient utilization factors.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 31–36

Удобрения

УДК 631.8:631.445

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ

© 2021 г. Р. А. Афанасьев[1,*], Г. Е. Мерзлая[1,]**

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

**E-mail: rafail-afanasev@mail.ru*

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

Поступила в редакцию 03.07.2020 г.
После доработки 12.08.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

В длительном полевом опыте на легкосуглинистой дерново-подзолистой почве (Смоленская обл.) за 37-летний период исследования действия и последействия различных систем удобрения на продуктивность полевых севооборота, качество продукции и плодородие почвы наибольший эффект достигался при использовании органо-минеральной системы, превосходящей по комплексу показателей минеральную и органическую системы удобрения.

Ключевые слова: органическая, минеральная и органо-минеральная системы удобрения, продуктивность, полевые севообороты, качество растительной продукции, плодородие почвы.

DOI: 10.31857/S0002188121020034

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мировом земледелии возник интерес к органическому земледелию ввиду его кажущейся экологической безопасности для природы и населения. Вместе с тем ведущий агрохимик современной России академик В.Г. Минеев с зарубежными коллегами утверждал, что правильное применение минеральных удобрений не приводит к негативным экологическим последствиям [1, 2], тем более, что во многих странах продолжается возрастающее применение минеральных удобрений, обеспечивающих рост продуктивности сельскохозяйственных культур, о чем свидетельствуют работы [3]. Еще ранее [4] было установлено, что в Западной Европе повышение продуктивности земледелия было вызвано началом массового применения минеральных удобрений (конец 19 в. и начало 20 в.). За какие-нибудь 2 десятилетия с начала массового применения минеральных удобрений урожайность пшеницы почти удвоилась, достигнув, например, в 1910–1913 гг. в Голландии 2.6 т/га в среднем для всей страны, в Бельгии – 2.5, в Германии – до 2.2 т/га.

В настоящее время в мировом земледелии при использовании 175.5 млн т действующего вещества минеральных удобрений компенсируется >52% выноса NPK урожаями, т.е. >90 млн т. Эти данные свидетельствуют о значимости для сельскохозяйственного производства минеральных удобрений, не исключая целесообразности применения органических удобрений и других средств повышения урожайности сельскохозяйственных культур. За счет комплексного использования агрохимических средств среднегодовая урожайность зерновых культур в ряде европейских стран повысилась до 6–8 т/га, а в отдельных хозяйствах и более этого. Таким образом, развитие современного земледелия в основном базируется на преимущественном использовании минеральных удобрений в сочетании с применением органических удобрений и других агрохимических средств [5, 6]. Для изучения действия минеральных, органических удобрений и их сочетания в России и за рубежом проведен ряд длительных и краткосрочных полевых экспериментов. Ниже изложены результаты длительного полевого опыта, который позволил объективно оценить эффективность различных систем удобрения на продуктивность сельскохозяйственных культур в условиях Нечерноземной зоны РФ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схемой полевого опыта предусмотрено изучение 3-х основных систем применения удобрений в севообороте с сельскохозяйственными культурами, распространенными в западной части Нечерноземной зоны РФ, такими как озимая рожь, озимая и яровая пшеница, ячмень, овес, картофель, однолетние и многолетние травы, а также

Таблица 1. Влияние систем удобрения на продуктивность полевого севооборота

Система удобрения	Действие							Последействие		
	ротации севооборота				среднее за 4 ротации	прибавка		за 5-ю ротацию	прибавка	
	1-я	2-я	3-я	4-я	т з.е./га		%	т з.е./га		%
Контроль	2.70	2.13	2.34	1.69	2.21	–	–	1.82	–	–
Органическая	2.98	2.75	2.89	2.30	2.73	0.52	23.6	2.44	0.62	34.1
Минеральная	3.22	3.64	3.31	2.61	3.19	0.98	44.4	2.26	0.44	24.2
Органо-минеральная	3.18	3.07	3.21	2.06	2.88	0.67	30.4	2.57	0.75	41.2
HCP_{05}					0.42			0.24		

смесь гороха с овсом. Набор и чередование этих культур менялось в течение определенных ротаций севооборота за время проведенного исследования. Одна ротация определенного севооборота включала в основном 6–7 из перечисленных культур. Опыт проводили в течение 37 лет с 1979 г. по 2015 г., из которых первые 30 лет было отведено на изучение действия систем удобрения на агроценозы и 7 лет – на их последействие. Исследование в опыте проводили общепринятыми методами [7–9].

Опыт был заложен на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, характерной для западной части Нечерноземной зоны, со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) – 1.4% С, общего азота – 0.13%, подвижного фосфора (P_2O_5) (по Кирсанову) – 159 мг/кг, обменного калия (по Масловой) (K_2O) – 139 мг/кг, pH_{KCl} 5.6. В целом по уровню плодородия почва характеризовалась как слабокислая, достаточно гумусированная, с повышенным содержанием подвижного фосфора и обменного калия. Повторность опыта трехкратная с площадью опытной делянки 112 м^2 (7 × 16 м). Схемой опыта предусмотрены варианты: 1 – контроль (без удобрений), 2 – органическая система удобрения (подстилочный навоз крупного скота натуральной влажности в среднегодовой дозе 9 т/га), 3 – минеральная система удобрения (среднегодовая доза N76.5P76.5K76.5), 4 – органо-минеральная система удобрения (подстилочный навоз в среднегодовой дозе 3 т/га + N25.5P25.5K25.5). В органической системе среднегодовая доза питательных веществ составляла N43.4P19.8K6.1, в сумме – 125.3 кг NPK, в минеральной системе – N76.5P76.5K76.5, в сумме 229.5 кг NPK, в органо-минеральной – N39.8P32.1K46.2, в сумме 118.1 кг NPK. В действующих веществах наибольшее количество элементов питания было внесено в варианте минеральной системы, а в вариантах органической и органо-минеральной систем различие в суммарных дозах NPK было в целом незначительным и равнялось всего лишь 7.2 кг/га. За 37-летний период исследования было выполнено 5 ротаций севооборота, из которых в 4-х ротациях изучали действие, а в 5-й ротации – последействие внесенных ранее удобрений на фоне применения $N_{аа}100$ во всех вариантах опыта, включая контрольные.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примененные системы удобрения оказали определенное влияние на продуктивность севооборота (табл. 1). В среднем за первые 4 ротации севооборота наибольшая продуктивность (3.19 т з.е./га) отмечена в варианте минеральной системы удобрения, на 44.4% превышавшей контроль. В органо-минеральной системе продуктивность аналогичного севооборота равнялась 2.88 т з.е./га, что на 30.4% превышало контроль. Продуктивность органической системы составила в среднем 2.73 т з.е./га, или на 23.6% больше контроля. Отмеченное в 4-й ротации снижение урожайности сельскохозяйственных культур по сравнению с первыми 3-мя ротациями в значительной мере было обусловлено общим снижением плодородия почвы в связи с проявлением отрицательного баланса питательных веществ и переходом их, видимо, в менее доступное для растений состояние. По величине HCP_{05} все системы удобрения в действии и последействии в ротациях достоверно отличались от контрольного варианта, а из них наибольшее отличие имела минеральная система.

В то же время примененные системы удобрения по-разному отразились на окупаемости NPK

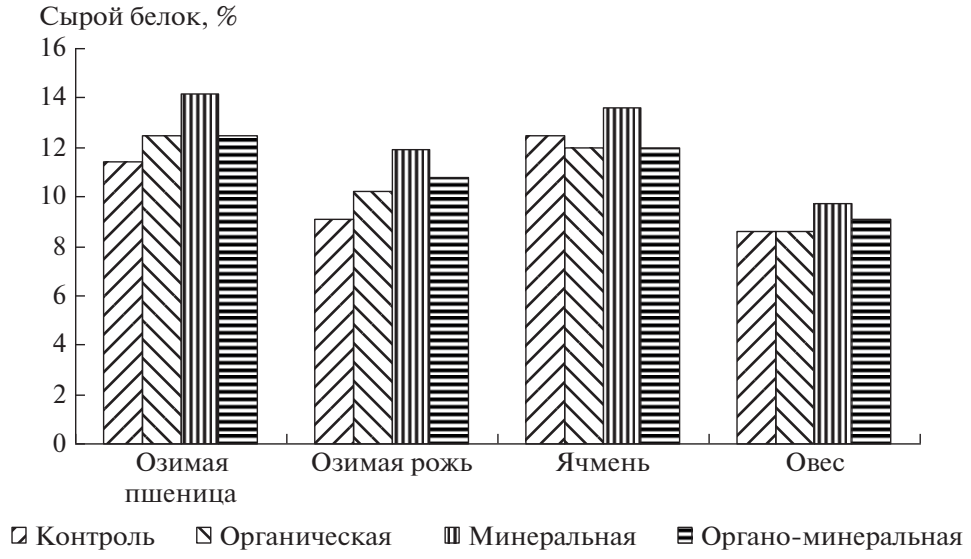

Рис. 1. Влияние систем удобрения на содержание сырого белка в зерне в 1-й ротации севооборота.

Рис. 2. Влияние систем удобрения на содержание крахмала в клубнях картофеля в 1-й ротации севооборота.

полученной продукцией. При этом в среднем за первые 4 ротации наибольшая окупаемость 1 кг NPK – 5.7 кг з.е. отмечена при применении органо-минеральной системы, при минеральной и органической систем – соответственно 4.3 и 4.2 кг з.е. В 5-й ротации, в которой изучали последействие удобрений, различие в продуктивности примененных ранее систем заметно снизилось. При этом наименьшее последействие удобрений на урожайность культур проявилось у минеральной системы, наибольшее – у органо-минеральной.

Системы удобрения вызвали также изменения в биохимическом составе растительной продукции, в частности в содержании сырого белка в зерне злаковых культур (рис. 1) и крахмала в картофеле (рис. 2). Например, в 1-й ротации севооборота минеральная система удобрения повышала практически во всех зерновых культурах содержание белка заметно больше (до 12.3%), чем органическая (до 10.8%) и органо-минеральная (до 11.1%). Отмечнга высокая положительная корреляция доз внесенных удобрений в разных системах удобрения с продуктивностью севооборота при $r = 0.98$ и содержанием белка в зерне – $r = 0.92$.

Примененные системы удобрения не оказали большого влияния на содержание крахмала в клубнях картофеля: в контроле и при применении разных систем оно менялось в пределах 19.5–20.2% при максимуме в контроле и с тенденцией

Таблица 2. Коэффициенты использования питательных веществ из удобрений (КИУ) сельскохозяйственными культурами в зависимости от систем удобрения, %

Система удобрения	За 4 ротации			За 5 ротаций		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Органическая	20.1	36.9	56.4	22.2	44.4	63.5
Минеральная	33.6	16.1	52.9	34.5	18.3	60.2
Органо-минеральная	35.7	22.8	71.3	42.6	30.0	97.4

к снижению в вариантах других систем применения удобрений. Отмечена отрицательная корреляция содержания крахмала в клубнях с дозами удобрений при применении разных систем – $r = -0.39$ и продуктивностью севооборота, т.е. с урожайностью этой культуры при $r = -0.57$. Иначе говоря, с повышением урожайности картофеля снижалось его потребительское качество.

Длительное действие и последействие систем удобрения оказали заметное влияние на коэффициенты использования NPK сельскохозяйственными культурами (табл. 2). В течение 4-х ротаций севооборота азот удобрений лучше использовался в минеральной и органо-минеральной системах (на уровне 34–36%), тогда как в органической – в 1.7–1.8 раза меньше. Фосфор удобрений, наоборот, эффективнее использовали сельскохозяйственные культуры в варианте органической системы, калий – в варианте органо-минеральной системы. С учетом последействия коэффициенты использования ранее внесенных удобрений (**КИУ**) возросли при сохранении отмеченных выше соотношений. В целом коэффициенты использования фосфора и калия значительно превышали уровни, установленные ранее, а КИУ азота соответствовали этим показателям [10, 11].

Среднегодовой баланс питательных веществ (NPK за 4 ротации севооборота) показал, что для азота и калия он во всех вариантах был отрицательным, для фосфора – в вариантах органической и органо-минеральной систем, в контроле – для всех элементов. При этом наименьший отрицательный баланс NPK отмечен в варианте минеральной системы удобрения, в котором суммарное количество внесенных питательных веществ превышало другие системы.

Действие и последействие различных систем удобрения повлияло на агрохимические показатели почвенного плодородия (табл. 3). На кислотность почвы наибольшее негативное воздействие оказала минеральная система удобрения. В действии в среднем в вариантах всех исследованных систем удобрения в почве снижалось содержание гумуса с 1.4 до 1.13%, калия – со 139 до 108 мг/кг при незначительном изменении содержания подвижного фосфора со 159 до 153 мг/кг. При этом наибольшее относительное снижение содержания почвенного гумуса отмечено в контроле – на 39% и в варианте минеральной системы удобрения – на 29%. На содержание обменного калия в почве системы удобрения влияли неоднозначно, повышая его в варианте органической системы и снижая в вариантах минеральной и органо-минеральной систем. В последействии удобрений в почве продолжалось снижение содержания гумуса и фосфора (за исключением минеральной системы), а также обменного калия в целом при применении всех исследованных систем удобрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В длительном полевом опыте, проведенном на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, в котором за 4 ротации севооборота в течение 30 лет изучали действие органической, минераль-

Таблица 3. Изменение агрохимических свойств почвы в ротациях севооборота

Система удобрения	pH_{KCl}			Гумус, % С			P_2O_5, мг/кг			K_2O, мг/кг		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Контроль	5.0	4.9	5.1	1.40	1.01	0.99	170	75	75	145	55	79
Органическая	5.7	5.1	5.4	1.23	1.04	1.04	143	160	141	138	145	70
Минеральная	6.0	4.7	5.2	1.53	1.19	1.17	149	174	183	135	100	97
Органо-минеральная	5.7	4.9	5.4	1.46	1.28	1.20	174	202	165	139	130	82
Среднее	5.6	4.9	5.3	1.40	1.13	1.10	159	153	141	139	108	82

Примечание. В графе 1 – исходное содержание, 2 – конец 4-й ротации, 3 – конец 5-й ротации.

ной и органо-минеральной систем удобрения и в 5-й ротации в течение 7 лет их последействие, установлены определенные различия их влияния на урожайность и качество сельскохозяйственных культур, а также на плодородие почвы.

В период действия удобрений наибольшее влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур оказала минеральная система, при которой за годы исследования получено в среднем 3.19 т з.е./га, наименьшее – органическая система при продуктивности 2.37 т з.е./га. Среднее положение занимала органо-минеральная система с продуктивностью сельскохозяйственных культур 2.88 т з.е./га. В последействии по продуктивности выделялась органо-минеральная система – 2.57 т з.е./га, второе место заняла органическая – 2.44 и третье – минеральная (2.26 т з.е./га). В среднем за годы действия и последействия удобрений в опыте максимальная урожайность (2.72 т з.е./га) получена при применении органо-минеральной и минеральной систем, в варианте органической системы – 2.4 т з.е./га, при продуктивности 2.0 т з.е./га в контроле.

По величине содержания сырого белка в зерне всех злаковых культур ведущее положение занимала минеральная система удобрения, из культур – озимая пшеница и ячмень. При применении других систем удобрения содержание сырого белка в зерне ячменя и овса не превышало контрольный вариант.

Различия в содержании крахмала в клубнях картофеля в контроле и в вариантах разных систем применения удобрений находились на уровне тенденции в пределах 19.6–20.2% со снижением последовательно от контроля к вариантам органической, минеральной и органо-минеральной систем. С повышением урожайности данной культуры заметно снижалось ее потребительское качество по этому показателю.

Влияние действия различных систем удобрения на плодородие пахотного слоя почвы проявилось в повышении кислотности почвенной среды при снижении pH за ротации в среднем в опыте с 5.6 до 4.9 ед., но особенно это было заметно в вариантах минеральной системы удобрения. В среднем во всех вариантах в почве снижалось содержание гумуса с 1.40 до 1.13% при наибольшем его сохранении в варианте органо-минеральной системы – 1.28% и наименьшем в варианте органической системы – 1.04%. При применении всех систем удобрения в почве повысилось содержание подвижного фосфора со 155 до 178 мг/кг при значительном снижении его в почве контрольного варианта. Содержание обменного калия за 4 ротации также снижалось как в контроле, так и в вариантах минеральной и органо-минеральной систем удобрения, несколько повысившись в варианте органической системы. К концу 5-й ротации в удобренных ранее вариантах опыта отмечено некоторое повышение pH почвенного раствора, дальнейшее снижение содержания гумуса, подвижного фосфора (за исключением варианта минеральной системы) и обменного калия.

За 37-летний период исследования действия и последействия различных систем удобрения на продуктивность полевых севооборотов, качество продукции и плодородие дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы наибольший эффект достигался при использовании органо-минеральной системы, превосходящей по комплексу показателей минеральную и еще более – органическую системы удобрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Минеев В.Г., Дебрецени Б., Мазур Т.* Биологическое земледелие и минеральные удобрения. М.: Колос, 1993. 415 с.
2. *Горчаков Я.В. Дурманов Д.Н.* Мировое органическое земледелие XXI века. М.: Изд-во ПАИМС, 2002. 402 с.
3. *Сычев В.Г., Алтухов А.И., Винничек Л.Б.* Российский рынок минеральных удобрений: проблемы и возможности решения // Плодородие почв России: состояние и возможности / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2019. С. 8–21.
4. *Прянишников Д.Н.* Избр. соч. Т. 1. Агрохимия. М.: Колос, 1965. 767 с.
5. *Бодрова Е.М., Озолина З.Д.* Совместное применение органических и минеральных удобрений. М.: Россельхозиздат, 1965. 141 с.
6. *Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П.* Агрохимия М.: ВНИИА, 2017. 854 с.
7. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.
8. *Ягодин Б.А., Дерюгин И.П., Жуков Ю.П.* Практикум по агрохимии. М.: Агропромиздат, 1987. 517 с.
9. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1961. 491 с.
10. *Кирикой Я.Т., Мерзлая Г.Е., Полунин С.Ф.* Нормативные показатели содержания азота, фосфора и калия в органических удобрениях и использование их сельскохозяйственными культурами. М.: ВИУА, 1991. 56 с.
11. *Державин Л.М.* Применение минеральных удобрений в интенсивном земледелии. М.: Колос, 1992. 212 с.

Comparative Efficiency of Fertilizer Systems

R. A. Afanas'ev[a,#] and G. E. Merzlaya[a,##]

[a] *D.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry*
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia
[#] *E-mail: rafail-afanasev@mail.ru*
[##] *E-mail: lab.organic@mail.ru*

In a long-term field experiment on light-loamy sod-podzolic soil (Smolensk region) over a 37-year period of research on the effects and aftereffects of various fertilizer systems on the productivity of field crop rotations, product quality and soil fertility, the greatest effect was achieved when using an organo-mineral system that exceeds the complex of indicators of mineral and organic fertilizer systems.

Key words: organic, mineral and organo-mineral fertilizer systems, productivity, field crop rotations, quality of plant products, soil fertility.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 37–46

Удобрения

УДК 631.41:631.415.12:631.81:633.63(470.32)

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО И УРОЖАЙНОСТИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ В ЦЧР

© 2021 г. О. А. Минакова[1,*], Л. В. Александрова[1], Т. Н. Подвигина[1]

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

*****E-mail: olalmin2@rambler.ru*

Поступила в редакцию 17.07.2020 г.
После доработки 31.08.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

Изменение физико-химических свойств почвы при применении различных доз минеральных удобрений в сочетании с навозом 25–50 т/га выражалось в повышении относительно варианта без удобрений гидролитической кислотности, содержания обменного Mg^{2+} и незначительном снижении степени насыщенности основаниями, а также изменении величины pH_{KCl}. Наибольшую буферность почвы в области слабокислых величин обеспечивало применение N45P45K45 + навоз 25 т/га, сильнокислых – N45P45K45 + навоз 50 т/га. Для содержания гумуса и подвижных форм NPK в почве не выявлено сильной зависимости от величины показателей состояния почвенного поглощающего комплекса. Высокие дозы минеральных удобрений в сочетании с навозом 25–50 т/га обеспечивали максимальную продуктивность сахарной свеклы, почвенная кислотность не лимитировала ее урожайность.

Ключевые слова: удобрения, навоз, физико-химические свойства, элементы питания, урожайность.
DOI: 10.31857/S0002188121020095

ВВЕДЕНИЕ

Сахарная свекла – высокопродуктивная культура, широко возделываемая в Российской Федерации. По своим биологическим особенностям она требовательна к реакции почвенной среды, оптимальная реакция почвенного раствора для нее – 7.0 ед. pH, допустимая – 6.0–8.0 ед., более высокие показатели наиболее благоприятны для почв с высоким содержанием илистых частиц, более низкие — для песчаных легких почв [1, 2]. Основные отрицательные последствия повышенной кислотности: снижение доступности основных элементов питания (особенно P_2O_5), кальция и микроэлементов, изменение состава микробного ценоза почвы [2, 3].

В настоящее время отмечено повсеместное подкисление пахотных земель. В Российской Федерации кислые почвы ($pH_{KCl} < 5.5$) занимают 34.8 млн га, в лесостепной зоне кислые почвы составляют 49.8% [4–7]. В ЦЧР доля кислых почв равна 48.5% [8]. Масштабное подкисление пахотных почв отмечается и для черноземов [9–11].

Физиологическая кислотность высоких доз минеральных удобрений [2, 12], выпадение кислотных дождей (pH = 3.0–4.0) [13], низкий уровень внесения органических удобрений (в 2019 г. в РФ навозом удобряли только 9.4% пашни, под сахарную свеклу вносили 2.2 т/га) [14], ризодепозиты сахарной свеклы (корневые экссудаты, слизи, ферменты, а также корневой опад) изменяют кислотность почв [15, 16].

Высокие урожаи сахарной свеклы обеспечиваются внесением значительных доз удобрений, т.к. культура требовательна к уровню обеспеченности элементами питания. Научно рекомендованными дозами в ЦЧР являются N90–150P120–150K90–150 [17], уровень применения минеральных удобрений на сахарной свекле в РФ достаточно высок (в отличие от большинства сельскохозяйственных культур). Например, в 2018 г. применяли 305 кг д.в./га посевов сахарной свеклы [18], из них 43.6% составляли азотные удобрения [19]. В условиях стационарных опытов доказано, что длительное применение повышенных доз минеральных удобрений изменяло физико-химические свойства почвы [20–23]. Внесение органических удобрений, известкование, применение научно обоснованных доз удобрений сдерживают нарастание

Таблица 1. Урожайность сахарной свеклы в паровом звене в 9-й ротации севооборота (2009–2017 гг.), т/га

Без удобрений	N45P45K45 + + навоз 25 т/га	N90P90K90 + + навоз 25 т/га	N135P135K135 + навоз 25 т/га	
26.3	37.9	37.0	40.3	
N45P45K45 + + навоз 50 т/га	N120P120K120 + + навоз 50 т/га	N190P190K190	$НСР_{05}$ фактора *А*	$НСР_{05}$ фактора *Б*
39.4	40.6	40.0	2.00	5.67

Примечание. Фактор *А* – навоз КРС, фактор *Б* – минеральные удобрения. То же в табл. 2, 3.

кислотности, а зачастую и оптимизируют ее [5, 20, 24].

Цель работы – изучение изменения кислотных свойств чернозема выщелоченного лесостепной зоны ЦЧР в стационарном опыте, заложенном в 1936 г.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в стационарном опыте по изучению влияния применения удобрений на почвенное плодородие и урожайность культур в севообороте с сахарной свеклой (год закладки – 1936 г., продолжается по настоящее время). Годы проведения исследования – 2009–2017 гг. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый на тяжелом карбонатном суглинке. Опыт заложен в трехкратной повторности в 9-польном зернопаропропашном севообороте со следующим чередованием культур: черный пар – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень с подсевом клевера – клевер 1-го года использования – озимая пшеница – сахарная свекла – травосмесь горох + овес – овес. Изучали почву и продукцию в следующих вариантах опыта: контроль (без удобрений), N45P45K45 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N190P190K190. Удобрения вносили только под сахарную свеклу с осени под зяблевую вспашку, навоз КРС – в черном пару. Минеральные удобрения применяли в основном в виде НАФК. Агротехника возделывания культур была общепринятой для зоны. В почвенных образцах определяли следующие показатели: pH_{KCl} (ГОСТ 26483-85), содержание гумуса по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), содержание обменного Ca^{2+} (ГОСТ 26487-85), обменного Mg^{2+} (ГОСТ 26428-85), величину гидролитической кислотности по Каппену (ГОСТ 26212-91), степень насыщенности основаниями – расчетным методом, содержание $N\text{-}NO_3$ (ГОСТ 26951-86), P_2O_5 и K_2O (ГОСТ 26204-91). В посевах сахарной свеклы проводили учет урожайности весовым методом (учетных делянок) с пересчетом по методике ВНИС [25]. Статистическую обработку данных и корреляционный анализ производили по [26].

Установлено, что черноземы выщелоченные во всех изученных вариантах полевого опыта имели благоприятные основные показатели плодородия (содержание гумуса, физические свойства почвы) [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайность корнеплодов сахарной свеклы в паровом звене в 9-й ротации севооборота после более чем 80 лет применения удобрений была наиболее высокой в вариантах N135P135K135 + + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га и N190P190K190 (39.4–40.6 т/га) (табл. 1). Эти системы удобрения повышали урожайность культуры на 49.8–54.4% (на 13.7–14.3 т/га), т.е. обеспечивали более интенсивное выделение в почву ионов H^+ относительно контроля, где урожайность составила 26.3 т/га. Низкие прибавки были отмечены в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га (11.6 и 10.7 т/га соответственно), увеличение относительно контроля – на 40.7–44.1%, что возможно, было связано с недостатком доступных форм NPK для такой высокопродуктивной культуры как сахарная свекла.

Оценивая действие удобрений на содержание NPK в почве, следует отметить, что более всего оно проявилось для содержания $N\text{-}NO_3$ (увеличение в удобренных вариантах относительно контроля в слое 0–20 см составило 20.4–98.6%, в слое 20–40 см – 26.8–103%) (табл. 2), несколько меньше – P_2O_5 (22.6–77.3% и 18.1–74.3% соответственно), менее всего – K_2O (11.1–28.6% и 18.9–35.6% соответственно). Наиболее высокое содержание $N\text{-}NO_3$ было отмечено в варианте N190P190K190, при этом внесение минеральных

удобрений совместно с навозом 50 т/га не обеспечивало его значительного повышения. Максимальное содержание P_2O_5 обеспечивало применение N135P135K135 + навоз 25 т/га, а системы N90P90K90 + навоз 25 т/га навоза, N120P120K120 + + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га навоза и N190P190K190 также способствовали значительному росту содержания данного элемента относительно контроля. Наибольшее содержание K_2O отмечено при применении N90P90K90 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 25 т/га, внесение навоза 50 т/га не способствовало повышению содержания элемента относительно минеральной системы (N190P190K190).

Длительно применяемые удобрения повышали градацию обеспеченности $N\text{-}NO_3$ с низкой в контроле до средней и повышенной в вариантах с удобрениями, P_2O_5 и K_2O – с повышенной до высокой (кроме вариантов N45P45K45 + навоз 25 т/га для P_2O_5 и N135P135K135 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га и N190P190K190 для K_2O). Повышение содержания NPK обеспечивало увеличение урожайности сахарной свеклы (как и других сельскохозяйственных культур в подобных исследованиях [29]) и, соответственно, способствовало дополнительному выделению ионов H^+ в почву, проявившегося вследствие обмена на ионы K^+ [28].

Изученный чернозем характеризовался относительно невысоким содержанием гумуса (в слое 0–20 см – от 4.83 до 5.27%, в слое 20–40 см – 5.00–5.65%, в целинном аналоге – 6.10 и 5.60% соответственно) (табл. 3). Снижение гумусности в контроле относительно целинного участка (расположенного в непосредственной близости от опыта) составило 1.27 абс.% в слое 0–20 см и 0.60 абс.% в слое 20–40 см, в удобренных вариантах – 0.83–1.40 и 0.24–0.77% соответственно, наименьшее снижение в слое 0–20 см было отмечено в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га и N120P120K120 + навоз 50 т/га вследствие поступления органического вещества повышенных доз навоза (50 т/га). Системы удобрения с навозом 25 и 50 т/га не обеспечивали повышение содержания гумуса относительно N190P190K190 в слое 0–20 см, но в слое 20–40 см было отмечено достоверное увеличение его содержания на 0.52% при внесении N135P135K135 + навоз 25 т/га и на 0.23% – при применении N45P45K45 + навоз 50 т/га. В целом применение удобрений сдерживало уменьшение содержания гумуса как за счет поступления органического вещества с навозом, так и дополнительного объема растительных остатков, образуемого прибавкой урожая культур при внесении минеральных удобрений. Значительное снижение содержания гумуса в верхнем слое почвы было связано с его распадом в аэробных условиях, складывавшихся при постоянной отвальной вспашке и обработке междурядий культуры.

Таблица 2. Содержание NPK в почве стационарного опыта, 9-я ротация

Глубина, см	Содержание, мг/кг почвы		
	$N\text{-}NO_3^-$	P_2O_5	K_2O
Контроль			
0–20	14.2	106	153
20–40	13.8	105	132
N45P45K45 + навоз 25 т/га			
0–20	17.1	130	197
20–40	17.5	124	177
N90P90K90 + навоз 25 т/га			
0–20	25.2	180	191
20–40	25.3	163	179
N135P135K135 + навоз 25 т/га			
0–20	24.8	188	141
20–40	23.9	183	169
N45P45K45 + навоз 50 т/га			
0–20	22.8	162	170
20–40	23.5	144	176
N120P120K120 + навоз 50 т/га			
0–20	24.4	152	181
20–40	27.6	148	158
N190P190K190			
0–20	28.2	157	172
20–40	28.0	145	157
$НСР_{05}$ фактора *А*			
0–20	3.5	20	–
20–40	3.1	–	14
$НСР_{05}$ фактора *Б*			
0–20	4.2	16	11
20–40	7.6	14	5.5

Сопоставление содержания гумуса в почве вариантов с удобрениями и в контроле выявило, что его повышение в слое 0–20 см составило 0.19–0.44%, в слое 20–40 см – 0.13–0.65%: в верхнем

Таблица 3. Физико-химические свойства и содержание гумуса в почве стационарного опыта

Глубина, см	Гумус, %	$H_г$, ммоль/100 г почвы	pH_{KCl}		Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	*V*, %
			май (1-й период)	июль (2-й период)	ммоль/100 г почвы			
Без удобрений								
0–20	4.83	2.98	5.42	5.32	20.7	3.57	24.3	89
20–40	5.00	2.71	5.36	5.30	19.9	3.60	23.5	90
N45P45K45 + навоз 25 т/га								
0–20	4.70	3.41	5.32	5.30	20.4	3.83	24.2	88
20–40	4.87	3.68	5.37	5.35	21.0	3.97	25.0	87
N90P90K90 + навоз 25 т/га								
0–20	5.02	2.63	5.31	5.24	21.2	3.57	24.8	87
20–40	5.17	3.33	5.40	5.16	21.4	3.40	24.8	88
N135P135K135 + навоз 25 т/га								
0–20	5.20	3.41	5.37	5.00	21.3	3.83	25.1	88
20–40	5.65	3.50	5.30	5.13	20.6	3.87	24.5	87
N45P45K45 + навоз 50 т/га								
0–20	5.27	2.89	5.42	5.32	21.0	3.88	24.9	90
20–40	5.36	2.89	5.33	5.37	21.6	3.60	25.2	91
N120P120K120 + навоз 50 т/га								
0–20	5.22	3.59	5.23	5.22	21.2	4.05	25.2	87
20–40	5.17	3.24	5.31	5.32	20.6	3.75	24.3	88
N190P190K190								
0–20	5.17	3.94	5.18	5.01	20.7	3.82	24.5	86
20–40	5.13	3.76	5.22	5.04	20.0	3.75	23.7	86
HCP_{05} фактора *А*								
0–20	0.08	0.20	0.05	–	–	0.04	–	–
20–40	–	0.29	–	–	–	–	–	1.0
HCP_{05} фактора *Б*								
0–20	0.06	0.60	0.03	–	–	0.06	0.3	2.2
20–40	0.16	0.55	–	–	–	–	0.8	0.8

Примечание: фактор *А* – навоз КРС, фактор *Б* – минеральные удобрения, ЕКО – емкость катионного обмена, V – степень насыщенности основаниями

слое наиболее значительно влияло внесение N45P45K45 + навоз 50 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N190P190K190, в нижележащем – N45P45K45 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га. В относительном выражении это составило 3.93–9.11% в слое 0–20 см и 2.60–13.0% в слое 20–40 см.

Гидролитическая кислотность почвы вариантов с внесением удобрений в слое 0–20 см составила 2.63–3.94 ммоль/100 г почвы в слое 0–20 см и 2.71–3.76 ммоль/100 г почвы в слое 20–40 см (в контроле – 2.98 и 2.71 ммоль/100 г почвы соответственно). Во всех вариантах с удобрениями она возрастала относительно контроля как в верхнем, так и нижнем слое, наибольшее увеличение (на 0.61–0.96 ммоль /100 г почвы) было отмечено при применении N190P190K190 и N120P120K120 + + навоз 50 т/га в слое 0–20 см и на 0.97–1.05 ммоль/100 г почвы при N45P45K45 + навоз 25 т/га и N190P190K190 в слое 20–40 см. Наиболее

низкая $H_г$ в слое 0–20 см (2.63 и 2.89 ммоль/100 г почвы) отмечена в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га, наиболее высокая (3.41–3.94 ммоль/100 г почвы) – в вариантах N190P190K190, N135P135K135 + навоз 25 т/га и N120P120K120 + навоз 50 т/га, что, очевидно, свидетельствовало об определяющем влиянии минеральных удобрений на повышение этого показателя и подтверждено данными дисперсионного анализа. Системы с навозом в дозе 25 т/га уменьшали данный показатель относительно системы только с минеральными удобрениями на 0.53–1.31 ммоль/100 г почвы в слое 0–20 см, на 0.26–0.43 – в слое 20–40 см, а системы с навозом в дозе 50 т/га – на 0.35–1.05 и 0.52–0.87 ммоль/100 г почвы соответственно, возможно, вследствие подщелачивающего действия навоза, что подтверждено данными дисперсионного анализа ($НСР_{05}$ навоза = 0.05, $НСР_{05}$ минеральных удобрений = 0.03).

Изучение динамики pH_{KCl} почвы под сахарной свеклой в начале вегетации выявило, что данный показатель менялся в слое 0–20 см от 5.18 до 5.42, в слое 20–40 см – от 5.22 до 5.40, в почве вариантов с применением удобрений отмечено его снижение на 0.05–0.24 в слое 0–20 см и 0.04–0.18 в слое 20–40 см относительно контроля. Наибольшие показатели pH_{KCl} были отмечены в слое 0–20 см – в контроле и в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га, в слое 20–40 см – также и при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га, наименьшие – при применении N190P190K190, N120P120K120 + + навоз 50 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га соответственно. Разница в величине pH_{KCl} систем с применением навоза 50 т/га и систем с навозом 25 т/га составила 0.04–0.14 в слое 0–20 см и 0.03–0.09 в слое 20–40 см, системы N190P190K190 и вариантов с навозом 25 т/га – 0.13–0.19 и 0.08–0.18 соответственно. Наибольшее различие показателей pH_{KCl} в слое 0–20 см было отмечено между вариантами с применением навоза 50 т/га и N190P190K190 – 0.05–0.24, что свидетельствовало о наибольшем подкисляющем влиянии дозы N190P190K190 относительно варианта с высокой дозой навоза КРС, имевшего щелочную реакцию. Разница в величинах pH_{KCl} вариантов с применением навоза 50 т/га и N190P190K190 в слое 20–40 см была несколько меньше и составила 0.09–0.11.

Величина pH_{KCl} в почве под сахарной свеклой в период активного роста (июль) менялась от 5.00 до 5.32 в слое 0–20 см и от 5.04 до 5.37 в слое 20–40 см, применение минеральных удобрений и навоза вызвало тенденцию к снижению ее относительно контроля на 0.02–0.32 и 0.14–0.34 соответственно. Наибольшие величины pH_{KCl} были отмечены в обоих слоях при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га, а в слое 0–20 см – также и в контроле. Наиболее низкими величины pH_{KCl} были при применении N190P190K190 и N135P135K135 + навоз 25 т/га как в слое 0–20, так и 20–40 см, в слое 0–20 см также в варианте N120P120K120 + навоз 50 т/га, в слое 20–40 см – в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га. В этот период отмечена тенденция к увеличению разницы показателей pH_{KCl} между вариантом N190P190K190 и вариантами применения навоза 50 т/га, что составило 0.21–0.31 ед. в слое 0–20 см и 0.28–0.32 ед. – в слое 20–40 см, относительно вариантов с навозом 25 т/га отмечена также тенденция к снижению показателей pH на 0.23–0.29 и 0.09–0.31 ед. соответственно. В слое 20–40 см при действии N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га выявили тенденцию к снижению pH_{KCl} на 0.16–0.19 ед. относительно варианта N120P120K120 + навоз 50 т/га.

Сезонная динамика показателя pH_{KCl} показала снижение на 0.02–0.37 ед. в слое 0–20 см и на 0.02–0.24 ед. в слое 20–40 см, что видимо было следствием поглощения сахарной свеклой кальция и других ионов щелочной природы из почвы и удобрений (или проявлением физиологической кислотности удобрений [2, 11]), а также увеличения корневых выделений культуры, имеющих кислую природу [16], и вследствие поглощения культурой K^+ путем обмена его ионов на ионы H^+, что также подкисляло почву [29]. С увеличением доз минеральных удобрений как на навозном, так и безнавозном фонах, выявлено повышение разницы между показателями pH_{KCl} в мае и июле, в слое 0–20 см оно проявилось в наибольшей степени, что было связано с бóльшим влиянием корневой системы культуры и ее агротехники, заключавшейся в многократных рыхлениях верхнего слоя и создании постоянных аэробных условий.

Содержание обменного Ca^{2+} в почве опытного участка как в слое 0–20 см, так и 20–40 см, имело тенденцию к повышению, но достоверно не изменялось. В вариантах применения N90P90K90 + + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га в слое 0–20 см и N90P90K90 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га в слое 20–40 см обнаружили наибольшее содержание данного элемента.

Влияние длительно вносимых удобрений на увеличение содержания обменного Mg^{2+} (на 0.26–4.80 ммоль/100 г почвы или на 7.00–13.4% относительно контроля) достоверно проявилось

Таблица 4. Буферность почвы стационарного опыта

Добавлено 0.1 щелочи/кислоты, мл	Контроль	N90P90K90 + + навоз 25 т/га	N135P135K135 + + навоз 25 т/га	N45P45K45 + + навоз 50 т/га	N190P190K190	Песок
10	9.07	9.62	9.02	9.08	8.75	11.2
8	8.32	8.58	8.70	9.20	8.99	11.3
6	8.22	8.35	8.32	8.74	8.05	11.3
4	7.60	8.08	7.64	7.63	7.26	11.0
2	6.84	7.64	7.17	6.96	6.75	10.3
0	6.92	6.81	6.22	6.67	6.18	8.3
2	5.70	6.00	5.60	5.50	5.40	2.7
4	4.53	4.73	4.59	4.40	4.02	2.6
6	3.84	3.91	4.11	3.85	3.57	2.1
8	3.39	3.53	3.53	3.80	3.20	1.8
10	2.99	3.13	3.06	2.77	2.84	1.7

в слое 0–20 см в наибольшей степени в вариантах N120P120K120 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га, минеральные удобрения в большей степени способствовали изменению данного показателя. В слое 20–40 см не было отмечено достоверных изменений, выявлена только тенденция к увеличению содержания этой формы элемента в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га.

Было показано достоверное влияние минеральных удобрений на величину содержания суммы Ca^{2+} + Mg^{2+} в почве стационарного опыта: в слое 0–20 см увеличение на 0.5–0.9 ммоль/100 г почвы отмечено в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га, в других вариантах этот показатель оставался на уровне контроля, не проявляя тенденцию к снижению. В слое 20–40 см также было выявлено увеличение этого показателя на 0.8–1.7 ммоль/100 г почвы, в наибольшей степени в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га, N45P45K45 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + навоз 25 т/га, а система N190P190K190 не способствовала изменению содержания суммы Ca^{2+} + Mg^{2+}.

В слое 0–20 см отмечена высокая – 86–90% – степень насыщенности основаниями, что не требовало известкования почвы. В слое 0–20 см было отмечено снижение степени насыщенности основаниями (*V*) на 2–3%, минеральные удобрения в составе систем N90P90K90 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, а также минеральная система N190P190K190 оказывали влияние на этот показатель. Данный показатель достоверно снизился относительно контроля в слое 20–40 см на 2–4%. При внесении N190P190K190 разница между этими вариантами была максимальной и составила 4%, а минимальной она была между вариантами с применением навоза 50 т/га и контролем (1%). Под влиянием N45P45K45 + навоз 50 т/га отмечена тенденция к повышению *V* как в слое 0–20, так и в слое 20–40 см почвы.

Сравнение буферности почвы разных вариантов выявило, что при добавлении щелочи разной концентрации наиболее низкий pH почвенной вытяжки отмечен в варианте N190P190K190, что свидетельствовало о дополнительном выделении ионов кислой природы в раствор из почвенного поглощающего комплекса. Наиболее высокий pH в области щелочных величин был отмечен при действии систем удобрения N45P45K45 + навоз 50 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га, что свидетельствовало о самом малом выделении подобных ионов из почвы этих вариантов. Разница в кислотности почвы разных вариантов в щелочной области составила 0.69–0.88, ее сокращение отмечено при добавлении 4 и 6 мл щелочи (табл. 4).

При добавлении кислоты в почвенную вытяжку разница в величине pH в вариантах опыта составила 0.36–0.71, при приливании большего количества кислоты разница сокращалась, меньшего – расширялась. Наиболее высокий pH был отмечен в основном в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га, и в меньшей степени – в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + на-

Таблица 5. Уравнения взаимных связей (коэффициенты парной корреляции) параметров физико-химического состояния и содержания гумуса (слой 0–20 см) для почвы стационарного опыта

Показатель физико-химического состояния почв	Уравнение (коэффициент парной корреляции)	Показатель физико-химического состояния почв	Уравнение (коэффициент парной корреляции)
$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	$y = 1.486x + 17.1$ (0.833)	V	–
Ca^{2+}	$y = 1.111x + 15.3$ (0.723)	pH_{KCl} в 1-й срок отбора	–
Mg^{2+}	$y = 0.401x + 1.765$(0.510)	pH_{KCl} во 2-й срок отбора	$y = -0.300x + 6.72$ (0.469)
ЕКО	–	$H_г$	–

Примечание. В уравнениях $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. Ca^{2+}. Mg^{2+}. pH_{KCl} соответствуют переменной y, содержание гумуса – переменной x, прочерк – связь отсутствует.

Таблица 6. Уравнения взаимных связей (коэффициенты парной корреляции) pH_{KCl} и содержания NPK в почве стационарного опыта

Содержание основных элементов питания	Уравнение (коэффициент парной корреляции), слой 0–20 см	Уравнение (коэффициент парной корреляции), слой 20–40 см
$N\text{-}NO_3$	$y = -2.049x + 13.1$ (0.420)	$y = -3.78x + 22.3$ (0.483)
P_2O_5	–	–
K_2O	$y = -13.5x + 89.3$ (0.580)	–

Примечание. В уравнениях $N\text{-}NO_3$, P_2O_5, K_2O соответствуют переменной y, pH_{KCl} – переменной x, прочерк – связь отсутствует.

Таблица 7. Уравнения взаимных связей (коэффициенты парной корреляции) параметров pH_{KCl}, $H_г$ и урожайности сахарной свеклы в 9-й ротации

Слой	Уравнение (коэффициент парной корреляции), x соответствует $H_г$	Уравнение (коэффициент парной корреляции), x соответствует pH_{KCl}, 1-й срок	Уравнение (коэффициент парной корреляции), x соответствует pH_{KCl}, 2-й срок
0–20 см	$y = 4.85x + 21.5$ (0.434)	$y = -28.1x + 187$ (–0.509)	$y = -17.7x + 129$ (–0.489)
20–40 см	$y = 8.17x + 10.4$ (0.632)	$y = -37.5x + 277$ (–0.437)	–

Примечание. y – урожайность корнеплодов сахарной свеклы, т/га.

воз 25 т/га, наиболее низкий – в варианте N190P190K190.

В ходе исследования выявлена сильная связь ($r \sim 0.4$–0.8) содержания суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, а также содержания Ca^{2+} с содержанием гумуса в слое 0–20 см (табл. 5). Зависимость этих показателей была прямая, наиболее тесной она была для суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. Зависимость величины pH_{KCl} во 2-й срок отбора (июль), а также содержания обменного Mg^{2+} с содержанием гумуса была средней степени, прямая – для Mg^{2+} и обратная – для pH_{KCl}, в первом случае она была более выражена. Эти зависимости проявились только в слое 0–20 см, в слое 20–40 см их не выявили. Такие показатели, как pH_{KCl} в начале вегетации, емкость катионного обмена и сумма обменных оснований не зависели от содержания гумуса ни в слое 0–20, ни в слое 20–40 см.

В ходе исследования выявлена связь ($r \sim 0.4$–0.6) содержания основных элементов питания ($N\text{-}NO_3$ – в обоих слоях и K_2O – в слое 0–20 см) с величиной обменной кислотности (табл. 6). Зави-

симость была отрицательная, с повышением кислотности снижалось содержание NPK, в наибольшей степени – K_2O в слое 0–20 см, в наименьшей – $N\text{-}NO_3$ в том же слое. Обменная кислотность не оказывала влияние на содержание подвижных форм P_2O_5 как в слое 0–20, так и 20–40 см, а K_2O – только в слое 20–40 см.

Отрицательная зависимость содержания NPK и pH_{KCl} в опыте, при том, что в литературе имеются противоположные данные [2, 4], объясняется изменением кислотности в небольшом интервале, в котором NPK почвы в значительной степени доступны растениям, тогда как с ростом доз удобрений содержание NPK изменялось гораздо более значительно. Установлено, что урожайность корнеплодов сахарной свеклы имела отрицательную зависимость от pH_{KCl} и положительную – от гидролитической кислотности. Наиболее тесная связь урожайности отмечена с величиной $H_г$ в слое почвы 20–40 см, наименее – $H_г$ в слое 0–20 см (табл. 7). В целом урожайность в средней степени зависела от pH_{KCl} и $H_г$, что свидетельствовало о том, что обменная и потенциальная кислотность в незначительной степени определяли уровень урожайности основной культуры севооборота, возможно, вследствие невысоких их величин, не оказывавших негативного влияния на развитие сахарной свеклы.

ВЫВОДЫ

1. Внесение минеральных удобрений совместно с навозом 50 т/га в пару, а также N190P190K190 и N135P135K135 + навоз 25 т/га обеспечивало наиболее высокую урожайность корнеплодов сахарной свеклы и способствовало дополнительному выделению H^+ в почву корнями растений. Различные формы почвенной кислотности не оказывали значительного влияния на величину урожая культуры.

2. Удобрения в большей степени влияли на содержание NPK в почве, чем на кислотные свойства почвы. Более всего действие удобрений проявилось на содержании $N\text{-}NO_3$ (увеличение в удобренных вариантах относительно контроля в слое 0–20 см составило 20.4–98.6, в слое 20–40 см – 26.8–103%), несколько меньше – P_2O_5 (22.6–77.3% и 18.1–74.3% соответственно), менее всего – K_2O (11.1–28.6% и 18.9–35.6% соответственно).

3. Длительное применение удобрений изменяло физико-химические свойства чернозема выщелоченного относительно варианта без удобрений: повышало гидролитическую кислотность в слое 0–20 см на 0.61–0.96 ммоль/100 г почвы, в слое 20–40 см – на 0.97–1.05 ммоль/100 г почвы, содержание обменного Mg^{2+} в слое 0–20 см – на 0.26–4.80 ммоль/100 г почвы, сумма Ca^{2+} и Mg^{2+} в слоях увеличивалась на 0.5–0.9 и 0.8–1.7 ммоль/100 г почвы соответственно, но снижало степень насыщенности основаниями в слое 0–20 см на 2–3 и в слое 20–40 см – на 2–4%, pH_{KCl} в начале вегетации – на 0.05–0.24 ед. в слое 0–20 см.

4. Удобрения оказывали наибольшее воздействие на величину pH_{KCl} в слое 0–20 см в начальный период развития культуры, на этот показатель в большей степени влияло внесение навоза в пару, чем минеральных удобрений под сахарную свеклу. В течение вегетации отмечено снижение величины pH_{KCl} на 0.10–0.37 ед., как в слое 0–20 (в меньшей степени), так и 20–40 см (в большей степени) вследствие увеличения корневых выделений культуры (при внесении удобрений динамика показателя была более выражена вследствие увеличения обменного поглощения ионов K^+ и H^+).

5. Оптимальные показатели физико-химических свойств чернозема выщелоченного обеспечивала применяемая в севообороте более 80 лет система N45P45K45 + навоз 50 т/га.

6. Оценка буферности чернозема выщелоченного позволила установить, что наибольшее содержание оснований, препятствующих подкислению, отмечено в почве варианта N90P90K90 + + навоз 25 т/га, в области сильнокислых величин – также и при действии систем N45P45K45 + навоз 50 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га.

7. Содержание гумуса в почве удобренных вариантов увеличивалось относительно контроля и проявляло значительную зависимость от содержания обменного кальция, а также суммы Ca^{2+} и Mg^{2+}.

8. Не отмечено тесной математической связи величины pH_{KCl} и содержания NPK в почве вследствие небольшой степени снижения кислотности и значительного повышения содержания элементов питания. Изменения кислотности при внесении удобрений происходили в области слабокислых величин, при которых NPK почвы были наиболее подвижны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шпаар Д., Сушков М.* Выращивание сахарной свеклы. М.: ИК “Родник”, 1996. 144 с.
2. *Минеев В.Г.* Агрохимия: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, Колос, 2004. 720 с.
3. *Девятова Т.А.* Ферментативная активность чернозема выщелоченного при длительном систематиче-

ческом применении удобрений // Агрохимия. 2006. № 1. С. 12–15.

4. Агрохимическая характеристика пахотных почв природных сельскохозяйственных зон и провинций России (по данным агрохимического обследования). Бюл. Географ. сети опытов с удобрениями. Вып. 9. М.: ВНИИА, 2010. 33 с.

5. *Сычев В.Г.* Инновационные аспекты совершенствования агрохимического обслуживания сельскохозяйственного производства // Инновационно-технологические основы развития земледелия. Сб. докл. Всерос. научн.-практ. конф. Курск: ВНИИЗи ЗПЭ, 2006. С. 15–19.

6. *Сычев В.Г., Кузнецов А.В., Павлихина А.В., Лобас Н.В.* Содержание гумуса, подвижного фосфора, обменного калия и степень кислотности пахотных почв Российской Федерации // Плодородие. 2008. № 3 (42). С. 1–3.

7. *Шильников И.А., Аканова Н.И.* Вопросы известкования почв в современных условиях // Плодородие. 2011. № 3. С. 22–24.

8. *Сычев В.Г., Аристархов А.И., Державин Л.М.* Плодородие почв сельскохозяйственных земель и эффективность применения удобрений на черноземах центральной России // Черноземы центральной России: генезис, география, эволюция. Матлы Международ. конф., посвящ. 100-летию П.Г. Адерихина. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2004. С. 501–506.

9. *Зезюков Н.И., Дедов А.В., Девятова Т.А.* Снижение почвенной кислотности черноземных почв // Проблемы экологии в сельском хозяйстве. Тез. докл. научн. конф. Пенза: Приволж. дом научн.-техн. пропаганды, 1993. С. 74–75.

10. *Макеева Т.Ф., Наконечный А.Г., Казьмин В.М.* Мониторинг уровня кислотности в пахотных почвах Орловской области // Rus. Agricult. Sci. Rev. 2015. Т. 6. № 6–1. С. 166–172.

11. *Мацнев И.Н., Арзыбов Н.А.* Изменение уровня гумусированности и кислотности почв Тамбовской области //Вестн. МичуринскГАУ. 2006. № 1. С. 79–81.

12. *Макаров В.И.* К физиологической кислотности азотных удобрений // Вестн. АлтайГАУ. 2013. № 8 (106). С. 027–030.

13. *Рэуце К., Кырстя С.* Борьба с загрязнением почв. Пер. с румынского. М.: Агопромиздат, 1986. 220 с.

14. Россия в цифрах. 2019: Крат. стат. сборник. М.: Росстат, 2019. 549 с.

15. *Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М.* Биология почв. М.: Академия, 2004. 248 с.

16. *Стахурлова Л.Д., Свистова И.Д., Щеглов Д.И.* Биологическая активность как индикатор плодородия черноземов в различных биоценозах // Почвоведение. 2007. № 6. С. 769–774.

17. Система ведения агропромышленного производства Воронежской области до 2010 года / Под ред. Хицкова И.Ф. Воронеж: Центр духовного возрождения Черноземного края, 2005. 464 с.

18. Рынок минеральных удобрений – 2019 год. [Электр. ресурс] // dcenter.hse.ru URL: https://dcenter.hse.ru/data/2019/12/26/1524652323/Рынок%20минеральных%20удобрений.2019.pdf. (дата обращения: 29.02.2019).

19. Основные направления исследований по агрохимии азота в современном земледелии. Бюл. Географ. сети опытов с удобрениями. Вып. 6. М.: ВНИИА, 2009. 76 с.

20. *Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Ковшик И.Г.* Изменение агрохимических свойств основных пахотных почв юга Дальнего Востока при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1244–1250.

21. *Матвеева К.Н.* Оптимизация повышенной кислотности почвы путем использования органических удобрений // Актуал. научн. исслед-я в совр. мире. 2016. № 8–1(16). С. 31–34.

22. *Жеряков Е.В.* Регулирование физико-химических свойств черноземных почв // Агрохимические приемы повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур в адаптивно–ландшафтном земледелии. Мат-лы научн. конф. М.: ВНИИА, 2006. С. 33–35.

23. *Ореховская А.А., Навольнева Е.В., Соловиченко В.Д., Ступаков А.Г., Ореховская Т.А., Куликова М.А., Беспаленко А.С.* Влияние доз удобрений на кислотные свойства чернозема типичного // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия. Сб. докл. научн.-практ. конф. с международ. участием Курского отделения МОО “Общество почвоведов им. В.В. Докучаева”. Курск: ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2016. С. 226–229.

24. *Волынкин В.И., Копылов А.Н., Волынкина О.В.* Влияние минеральных удобрений на урожайность культур и агрохимические свойства выщелоченного чернозема // Плодородие. № 6. 2014. С. 14–16.

25. *Барнштейн Л.А., Гизбуллин Н.Г.* Методика исследований по сахарной свекле. Киев: ВНИС, 1986. 262 с.

26. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) М.: Книга по Требованию, 2012. 352 с.

27. *Королев В.А., Громовик А.И., Боронтов О.К.* Изменение основных показателей плодородия чернозема выщелоченного при разных способах основной обработки // Почвоведение. 2016. № 1. С. 107–114.

28. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Влияние запасов минеральных форм азота на продуктивность севооборота // Агрохимия. 2016. № 1. С. 17–26.

29. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Изменение физико-химических свойств серых лесных почв Ополья при длительном применении удобрений // Докл. РАСХН. 2015. № 3. С. 34–38.

Change of Physical and Chemical Properties of Leached Chernozem and Productivity of Grain-Beet Crop Rotation under Long-Term Application of Fertilizers in the Central Black-Earth Region

O. A. Minakova[a,#], L. V. Alexandrova[a], and T. N. Podvigina[a]

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

[#] *E-mail: olalmin2@rambler.ru*

When using the different doses of mineral fertilizers in combination with manure 25–50 t/hectare, change of the soil physical and chemical characteristics was expressed as increase of hydrolytic acidity and exchange Mg^{2+} content, but decrease base saturation degree and pH_{KCl} in comparison with the variant without fertilizers. As for low acidity values, using N45P45K45 + manure 25 t/hectare, provided the greatest soil buffering. In terms of high acidity values, application of N45P45K45 + manure 50 t/hectare had the same effect. In general, humus soil state and NPK content did not show a strong dependence on values of soil absorbing complex state indices. High doses of mineral fertilizers in combination with manure 25–50 t/hectare ensured maximum productivity of sugar beet. Soil acidity did not limit its yield.

Key words: fertilizers, manure, physical and chemical characteristics, nutrient elements, yield.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 47–54

Удобрения

УДК 635.52:631.8

ВЫРАЩИВАНИЕ САЛАТА ЛИСТОВОГО НА СМЕСЯХ ЦЕОЛИТНОГО СУБСТРАТА С БЕСПЛОДНЫМИ И ПИТАТЕЛЬНЫМИ ГРУНТАМИ

© 2021 г. В. С. Солдатов[1,*], А. П. Езубец[1], О. В. Ионова[1], С. Ю. Косандрович[1]

[1] *Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси*
220072 Минск, ул. Сурганова, 13, Республика Беларусь

******E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by*

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.
После доработки 24.08.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

В вазонных лабораторных экспериментах изучено влияние гранулометрического состава цеолитного субстрата Цион® и его содержания в различных бесплодных и удобренных грунтах на рост салата листового *Lactuca sativa* L. сорта Афицион. Установлено, что размер частиц субстрата сильно влиял на плодородие с оптимумом в интервале 0.7–3.0 мм. В качестве грунтов, к которым добавляли Цион, использовали нейтрализованный верховой торф, коммерческий питательный торфогрунт, песок и природный суглинок. При внесении в грунты малых добавок Циона (1–5 г/растение) во всех случаях наблюдали увеличение сырой биомассы растений на ~2 г биомассы/г добавленного субстрата, независимо от вида субстрата, наличия в нем NPK-удобрений и количества основного грунта. Максимальный урожай получили на субстрате Цион с небольшой добавкой бесплодного нейтрализованного верхового торфа (~10% об.), что объясняется улучшением водно-воздушных свойств питательной среды.

Ключевые слова: цеолитный субстрат, листовой салат, питательные добавки к почвам.

DOI: 10.31857/S0002188121020113

ВВЕДЕНИЕ

В литературе имеется большое количество публикаций, в которых описано положительное влияние добавки природных цеолитов к почвам на их плодородие. Это связано с улучшением агрофизических свойств почв и наличием в цеолитовых туфах некоторого количества калия в ионообменном состоянии, а также отдельных микроэлементов, содержащихся в сопутствующих минералах (обычно 20–50%). В состав последних входят кальциты и доломит – стабилизаторы pH почвы и источники кальция и магния. Однако сами они не пригодны для выращивания растений, т.к. не содержат всех необходимых питательных элементов.

В середине прошлого века начались исследования по получению и применению полноценных питательных сред на основе химически модифицированных цеолитов. Группой болгарских ученых [1] было показано, что природный клиноптилолитовый туф, насыщенный в определенных пропорциях ионами питательных элементов и гидрофилизированный гидрогелем полиакриламида можно использовать как полноценную питательную среду для выращивания растений. Исследования в этой области, имевшие частичный успех, были выполнены в рамках программ NASA [2–4]. Добавление цеолитных смесей, насыщенных ионами питательных элементов к почве или некоторым бесплодным грунтам (песок, вермикулит, торф), обычно вызывало значительное улучшение роста растений [5–10]. Из этих работ также следует, что природные цеолитовые туфы могут сильно различаться по их влиянию на рост растений, и минералы каждого месторождения должны быть изучены отдельно. В настоящей работе был изучен клиноптилолит Холинского месторождения (Забайкальская группа, Россия).

В наших предыдущих работах [11, 12] было показано, что субстрат, содержащий 98% химически модифицированного клиноптилолита и 2% природных фосфорсодержащих минералов, является полноценной питательной средой для растений. В настоящее время налажено его опытно-промышленное производство, и он нашел значительное применение в выращивании растений в ком-

Таблица 1. Содержание обменно-связанных ионов в образце субстрата Цион pH 7.0 и их концентрация в водных вытяжках

Ион	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}
Содержание в субстрате, по вымыванию 0.3 н. HCl, мэкв/100 г	37	25	1.8	29	<0.01	<0.003	7.6*
Концентрация в вытяжке дистиллированной водой, мэкв/л	4.92	1.50	0.31	0.83	0.16	0	5.98**

*Концентрация, ммоль/100 г.
**Концентрация, ммоль/л.

натном, садовом и фермерском растениеводстве под названием Цион®.

Цель работы – изучение влияния гранулометрического состава субстрата Цион и его смесей с бесплодным и удобренным нейтрализованным верховым торфом, коммерческим питательным торфогрунтом, песком и природным суглинком на рост салата сорта Афицион.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Субстрат Цион (Пат. РФ № 2662772 от 16.11.2017 г.) производится в нескольких модификациях, различающихся актуальной кислотностью (pH 5.0–7.5) и номинальным соотношением $NH_4^+ : K^+ = 0.5–4.0$. Образец субстрата, полученный от производителя (http://zion.rus), имел характеристики, приведенные в табл. 1. Более подробные сведения по этому вопросу сообщали ранее [12].

Гранулометрический состав субстрата Цион, использованного в экспериментах приведен в табл. 2, характеристики водно-воздушных свойств субстрата и его отдельных фракций приведены в табл. 3.

Водно-воздушные свойства субстрата определяли в вазонах объемом 500 мл, использованных для выращивания растений. Они характеризовались объемной долей твердого субстрата (в %), суммой капиллярной и гравитационной воды и воздуха при использовании метода, описанного в [13]. Принимали, что плотность безводного цеолита равна 2.12 г/см^3, насыпная масса – 1.10 г/см^3, максимальное водопоглощение – 0.22 г H_2O/г цеолита, поглощение воды происходило без увеличения объема частиц.

Таблица 2. Гранулометрический состав исследованного образца промышленного клиноптилолита, использованного для получения субстрата Цион

Фракция частиц, мм	Масса, г	Содержание, масс. %
2–4	184.1	45.99
1.4–2	49.6	12.39
0.7–1.4	84.6	21.13
<0.7	82	20.26

В наших экспериментах использовали загущенный посев растений, что имитировало возможное применение цеолитных субстратов в мини-оранжереях.

Следующие грунты использовали в качестве компонентов смесей с субстратом Цион: 1 – кварцевый песок с размером частиц 0.5–3.0 мм, отмытый от кислотно-растворимых примесей 5% HCl; 2 – верховой торф Двина, нейтрализованный добавкой доломита, pH 6.5–7.0; 3 – природная дерново-подзолистая пылеватая среднесуглинистая почва, образец взят с территории, не бывшей в сельскохозяйственном использовании; 4 – питательный торфогрунт Флорабел (производитель ООО “Флорабел” Беларусь).

Полив растений производили водопроводной водой, ионный состав которой представлен в табл. 4 вместе с составами водных вытяжек из грунтов.

Растения салата листового *Lactuca sativa* L. сорта Афицион выращивали под лампами ДНБО1–4х9–001 У4.1 “Светодар” при освещенности 5000 лк. Период освещения – 18 ч/сут. Дневная температура – 20–22°C, ночная – 18–20°C. Другие условия выращивания растений приведены в описании каждого конкретного эксперимента.

Растения характеризовались сырой и сухой биомассой надземных и подземных органов, содержанием хлорофилла *a* и нитратов в листьях, параметры определяли с помощью общепринятых методик.

Проводили следующие эксперименты по выращиванию растений салата: 1 – исследование влияния размера частиц субстрата Цион на рост растений на 100%-ном субстрате и его смеси с бесплодным верховым торфом (10% об.). Условия

Таблица 3. Объемная доля твердой, водной и воздушной фаз в субстрате, использованном в биологическом эксперименте

Фракция частиц, мм	Твердая фракция	Водная фракция	Воздушная фракция
	%		
2–4	36.6	25.6	37.8
0.7–4	39.4	36.7	23.9
0.7–1.4	40.8	40.0	19.2
<0.7–4	43.7	40.0	16.3

выращивания: трехкратная повторность, вазоны 500 мл, высота 10 см, посевная площадь 64 $см^2$. Высевали 9 семян, после появления первых настоящих листьев оставляли 4 растения. Период выращивания – 32 сут; 2 – исследование влияния размера частиц субстрата Цион на рост растений на смеси 90% Цион + 10% бесплодного торфа. Эксперимент проводили по схеме, описанной в пункте 1. Использовали верховой, нейтрализованный добавкой доломита, торфогрунт Двина; 3 – влияние добавок субстрата Цион к питательному торфогрунту Флорабел. Растения выращивали в черных пластиковые вазонах высотой 8 см и посевной площадью 49 $см^2$, объем вазона 250 $см^3$. В каждый вазон высевали одно пророщенное семя, повторность трехкратная; 4 – влияние внесения малых доз субстрата в различные грунты. Исследовали следующие грунты: нейтрализованный верховой торф, суглинистая почва, не бывшая в сельскохозяйственном использовании, и песок. Опыт проводили в трехкратной повторности. Более подробно эти грунты характеризуются в табл. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что гранулометрический состав субстрата Цион, использованного в чистом виде или с 10%-ной добавкой бесплодного торфа, сильно влиял на рост растений салата. В полидисперсном субстрате, полученном от производителя, содержалось 20.26% “пылевой” фракции с размером частиц <0.7 мм, что приводило к сильному замедлению роста растений. После отсева этой фракции масса растений увеличилась почти в 2 раза. Статистически достоверной оказалось и уменьшение массы растений, полученных на субстрате с размером частиц 2–4 мм, по сравнению с частицами 0.7–2.0 мм. Эти эффекты были слабее выражены при добавлении торфа к цеолитному субстрату. По нашим наблюдениям, большое количество пылевой фракции приводило к образованию вокруг корней плотной глиноподобной массы, затвердевающей или сильно уплотняющейся при подсыхании, что препятствовало массообмену между корнем растения и средой (табл. 5).

Снижение продуктивности цеолитного субстрата, содержащего только частицы относительно крупного размера было связано с двумя факторами: 1 – замедлением процесса поступления ионов питательных веществ в субстратный раствор из-за увеличения длины диффузионного пути ионов в более крупных частицах цеолита и 2 – уменьшением водоудерживающей способности субстрата, что подтверждено данными табл. 3. Также показано, что присутствие пылевой фракции существенно уменьшало долю воздушной фазы в полидисперсном субстрате.

Добавление в цеолитный субстрат 10% бесплодного торфа вызывало резкое увеличение массы растений. Это было связано, вероятно, с увеличением водоудерживающей способности питательной среды и улучшением условий ионного обмена между корнем и частицами цеолита. Увлажненные частицы торфа могут служить ионпроводящими мостиками между ними и корнем растения. В отдельном эксперименте проверили идею о том, что из торфа экстрагируются какие-то вещества, ускоряющие рост растений. Однако оказалось, что полив растений, росших на чистом субстрате или его смеси с песком, водой, находившейся в контакте с нейтрализованным тор-

Таблица 4. Состав поливной воды и водных вытяжек из исследованных грунтов

Проба	pH	УЭП, мкСМ	NH_4^+	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
			м-экв/л							
Вода	7.0	563	0.00	0.00	0.50	1.34	3.19	0.76	0.54	0.18
Песок	7.5	399	0	0	0.026	0.063	0.387	0.007	0.005	0.008
Торф	6.7	443	0.15	0.07	0.47	3.58	1.98	0.85	0.63	0
Почва	7.4	406	0.03	0.04	0.69	1.01	3.34	0.80	0.57	0.16
Флорабел	7.2	881	0.00	0.95	0.41	2.75	6.44	1.87	0.88	5.95

Таблица 5. Влияние размера частиц субстрата на характеристики растений салата

Размер частиц, мм	Масса сухая надземная	Масса сухая подземная	Для массы подземной	Хлорофилл в листьях, мг/г	Нитраты в листья, мг/кг
	%				
Цион					
<0.7–4	1.22 ± 0.02	0.07 ± 0.02	5.4	3.2	53
0.7–4	2.11 ± 0.59	0.37 ± 0.08	14.9	2.7	52
0.7–2	2.95 ± 1.13	0.50 ± 0.09	14.4	2.2	32
2–4	1.66 ± 0.65	0.30 ± 0.07	15.3	2.5	68
Цион 90% (об.) + 10% торф					
<0.7–4	6.35 ± 0.35	0.53 ± 0.03	7.80	2.4	338
0.7–4	9.26 ± 0.68	1.51 ± 0.07	14.0	2.7	415
0.7–2	7.50 ± 1.04	1.44 ± 0.08	16.0	3.0	431
2–4	5.70 ± 0.79	1.03 ± 0.06	15.3	2.4	828

Таблица 6. Влияние добавки субстрата Цион к коммерческому питательному торфогрунту Флорабел на характеристики растений салата

Объемный % Циона	Масса сырая	Масса сухая	Хлорофилл в листьях, мг/г (±5%)	Нитраты в листьях, мг/кг (±5%)
	г			
0 (контроль)	11.2 ± 0.3	0.91 ± 0.04	1.92	180
2	12.9 ± 0.3	0.94 ± 0.05	2.70	190
8	18.5 ± 0.7	1.17 ± 0.06	2.58	1000
10	20.3 ± 1.2	1.23 ± 0.09	2.52	1220
15	25.1 ± 1.0	1.42 ± 0.08	2.46	1070

фом в течение 1 сут, вызывал заметное угнетение растений.

Добавка торфа не вызывала заметного изменения содержания хлорофилла в листьях, но приводила к резкому возрастанию содержания нитратов. Появление нитратов в растениях в наблюдаемых количествах могло быть вызвано только ростом нитрифицирующих бактерий в присутствии торфа поскольку их практически не было ни в исходном Ционе, ни в торфе. Известно, что

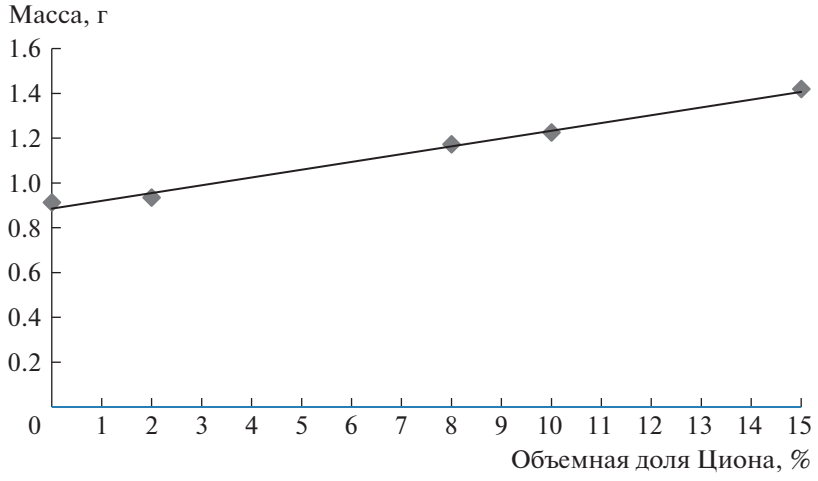

Рис. 1. Зависимость биомассы растений от объемной доли (%) субстрата Цион в питательном торфогрунте.

Таблица 7. Параметры биомассы надземных органов растений салата, выращенных на разных субстратах

Субстрат	Добавка Циона на одно растение	Масса сырая	Масса сухая	Нитраты в листьях, мг/кг (±5%)	Прирост урожая на 1 г Циона, г
	г				
	Верховой торф (25 сут после всходов)				
Торф	0	1.4 ± 0.7	0.10 ± 0.04		
	1	4.2 ± 0.5	0.25 ± 0.04	1250	2.8
	2	6.3 ± 1.5	0.36 ± 0.13	–	2.4
	5	8.4 ± 2.4	0.45 ± 0.13	150	1.4
Торф удобренный АЗФК	0	8.3 ± 3.1	0.43 ± 0.17	940	
	1	10.3 ± 4.0	0.54 ± 0.22	–	1.7
	2	11.4 ± 3.4	0.61 ± 0.15	560	1.4
	5	12.5 ± 2.4	0.64 ± 0.12	680	0.8
	Дерново-подзолистая почва и песок (36 сут после всходов)				
Почва	0	0.8 ± 0.4	0.11 ± 0.06	50	
	1	3.1 ± 0.4	0.27 ± 0.04	–	2.3
	2	4.9 ± 1.3	0.40 ± 0.10	220	2.0
	5	10.3 ± 2.2	0.84 ± 0.18	1350	1.9
Почва удобренная АЗФК	0	12.7 ± 3.1	0.88 ± 0.21	720	
	1	10.4 ± 3.3	0.65 ± 0.21	–	2.2
	2	14.8 ± 2.2	1.00 ± 0.14	780	2.0
	5	21.1 ± 2.3	1.29 ± 0.14	1210	2.1
Песок	0	0.1 ± 0.02	0.02 ± 0.01	–	
	1	2.5 ± 0.7	0.36 ± 0.11	–	2.2
	2	4.2 ± 1.4	0.64 ± 0.21	50	2.2
	5	10.3 ± 2.9	0.94 ± 0.26	490	2.1
Песок удобренный АЗФК	0	11.7 ± 5.5	0.51 ± 0.30	500	
	1	14.3 ± 4.9	0.73 ± 0.49	–	2.6
	2	16.1 ± 2.5	0.91 ± 0.13	890	2.2
	5	18.1±4.9	1.10±0.30	1320	1.3

бактериальный рост в почве и средах, содержащих органические материалы, резко ускоряется при добавке к ним цеолитов [14, 15]. Достоверного изменения массы корней растений при добавке к субстрату торфа не наблюдали.

Влияние добавок субстрата Цион к питательному торфогрунту. Торфогрунт Флорабел давно используют в садовом и комнатном растениеводстве в Беларуси. В эксперименте использовали вазоны объемом 250 мл, в которые высаживали по одному проросшему семени, повторность трехкратная.

Влияние добавки субстрата Цион к коммерческому питательному торфогрунту Флорабел показано в табл. 6. Из таблицы видно, что добавление Циона приводило к увеличению урожая и содержания нитратов в листьях салата. Зависимость биомассы растений от объемной доли субстрата Цион в питательном торфогрунте показана на рис. 1. Из приведенных данных видно, что биомасса растений линейно возрастает с ростом объемной доли субстрата Цион. Добавление 2% Циона приводило к минимальному статистически достоверному увеличению сырой биомассы, а 10–15%-ная добавка вызывала ее увеличение примерно в 2 раза.

Влияние малых добавок субстрата Цион к различным грунтам на рост растений. В инструкции производителя субстрата Цион (www.zion–rus.com) рекомендуемая доза его добавки в раз-

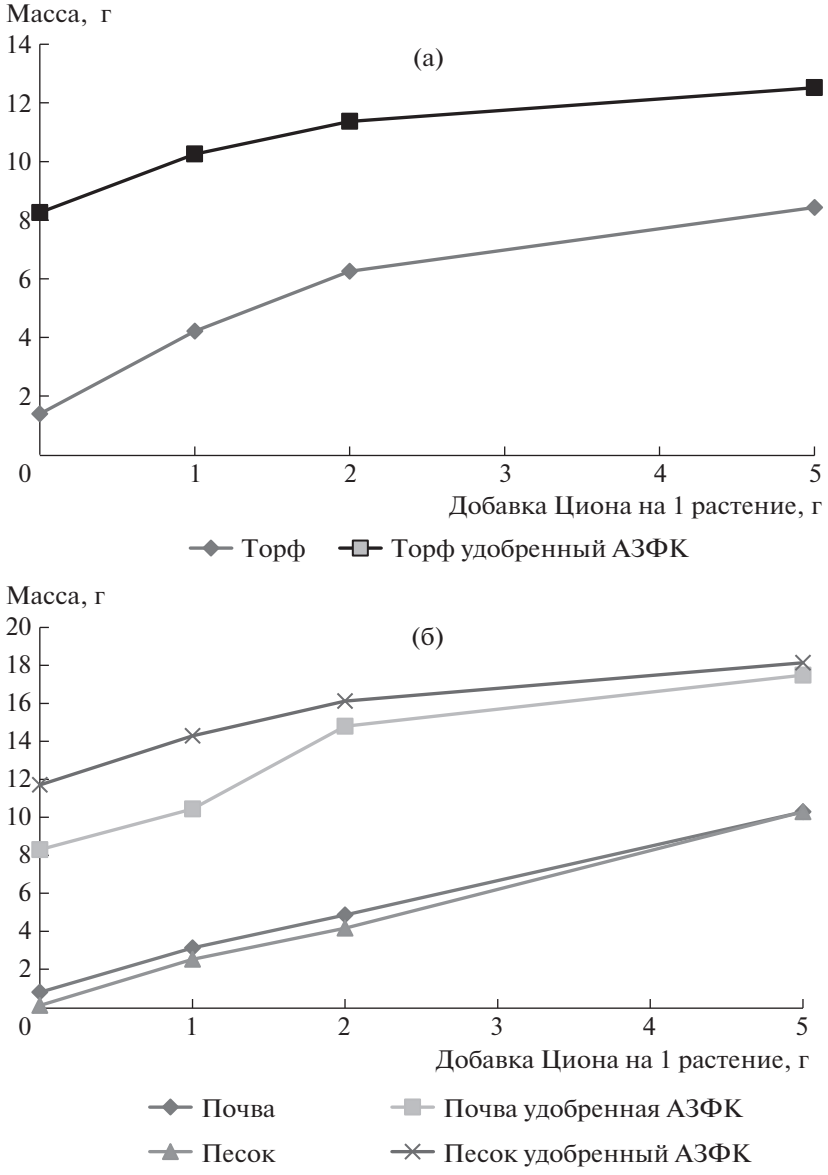

Рис. 2. Урожай вегетативной зеленой массы салата в зависимости от внесения Циона в разных дозах и субстратов: (а) – верховой торф, 25 сут после всходов, (б) – природная дерново-подзолистая пылеватая среднесуглинистая почва и песок, 36 сут после всходов.

личные среды составляет не менее 2 об. % (обычно 3–5%). Влияние меньших добавок не исследовали. В этом эксперименте количество Циона составляло 0, 5, 10 и 25 г (1, 2 и 5 г/растение). Это соответствовало 0.25. 0.5 и 1.25 об. % в питательной среде. В пересчете на 1 га это составило 3.5, 7 и 17.5 т соответственно. Цион вносили в посадочную лунку каждого растения и перемешивали с небольшим объемом основного грунта. Использовали вазоны объемом 2000 $см^3$ с посевной площадью 144 $см^2$ квадратной формы и высотой 19.5 см. Посев производили не пророщенными семенами. После появления на растениях первых настоящих листьев лишние растения удаляли и оставляли 5 растений, расположенных на максимальном расстоянии друг от друга. В качестве основного грунта использовали нейтрализованный верховой торф Двина, крупный песок (частицы 0.5–3.0 мм) и природную дерново-подзолистую среднесуглинистую почву. Добавку субстрата проводили в не удобренные и удобренные АЗФК (марки N16P16K16) основные грунты. Удобрение АЗФК вносили из расчета 1180 кг/га.

В период роста растений с интервалом 2 нед подсчитывали количество листьев и измеряли их длину и ширину. Оказалось, что растения мед-

леннее росли на питательных средах с дерново-подзолистой среднесуглинистой почвой и песком, чем с торфом. Поэтому их убирали по достижении одинаковой средней длины их листа ~8 см на 36-е и 25-е сут соответственно. Влияние количества внесенного в основной грунт Циона на массу надземных органов растений отражено в табл. 7, рис. 2. Прибавка средней массы одного растения составила от 1 до 3 г/г внесенного Циона. Однако разброс данных массы растений был слишком велик для доказательного заключения об эффективности малых добавок Циона к удобренным грунтам.

Выявлена четко выраженная тенденция к возрастанию урожая при добавке небольших доз Циона ко всем исследованным удобренным и не удобренным средам. Однако эффект добавки должен быть количественно определен в более крупномасштабном эксперименте.

ВЫВОДЫ

1. Гранулометрический состав субстрата Цион существенно влиял на рост растений салата. Оптимальной была фракция с частицами 0.7–3.0 мм. Наличие в субстрате значительного количества пылевой фракции замедляло рост растений.

2. Внесение 2–15% субстрата Цион существенно повышало плодородие питательного коммерческого торфогрунта.

3. Внесение 10% бесплодного верхового торфа в субстрат Цион улучшало рост растений салата.

4. Добавление в различные удобренные и не удобренные среды малых доз субстрата Цион (0.25–1.25%) приводило к заметному росту урожая салата, размер которого может быть определен в широкомасштабном эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Manolov I., Antonov D., Stoilov G., Tsareva I., Baev M.* Jordanian zeolitic tuff as a raw material for the preparation of substrates used for plant growth // J. Central Europ. Agr. 2005. № 6(4). P. 485–494.
2. *Ming D.W., Gruener J.E., Henderson K.E., Steinberg S.L., Barta D.J., Galindo C., Henninger D.L.* Plant growth experiments in zeolitic substrates: applications for advanced life support systems. http://zeolitavida.eu/wp–content/uploads/2014/06/zeoponics1.pdf – date of access 20.06.2019.
3. *Ming D.W., Allen E.R.* Zeoponic substrates for space applications: advances in the use of natural zeolites for plant growth // Natural microporous materials in environmental technology / Eds. Misaelides P., Macášek F., Pinnavaia T.J., Colella C. NATO Sci. Ser. (Ser. E: Appl. Sci.). 1999. V. 362. P. 157–176.
4. *Barbarick K.A., Lai T.M., Eberl D.D.* Exchange fertilizer (phosphate rock plus ammonium-zeolite) effects on sorghum-sudangrass // Soil Sci. Soc. Am. J. 1990. V. 54 (3). P. 911–916.
5. *Tan Y.W., Unonis M.N.A., Khairuddin M.I., Shaharuddin S., Ng C.C.* Mechanism in using commercial high efficient zeolite base green feed slow release fertilizers // J. Agr. Chem. Environ. 2018. V. 7. P. 1–9.
6. *Markovic V., Takac A., Ilin Z.* Effect of different substrates and production way on sweet pepper seedlings quality // Savremena-poljoprivreda (Yugoslavia). 1994. V. 42(1). P. 201–216.
7. *Andronirashvili T., Zautashvili M., Eprikashvili L., Pirtshkalava N., Dzagania M.* New substrate of prolonging action on the basis of natural zeolite and brown coal for growing agricultural crops // Bul Georg. National Acad. Sci. 2011. V. 5. № 2. P. 101–105.
8. *Рязанова О.А.* Научные основы формирования качества плодоовощной продукции, выращиваемой с применением ресурсосберегающих технологий: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1997. 40 с.
9. *Середина В.П.* Агроэкологические аспекты использования цеолитов как почвоулучшителей сорбционного типа и источник калия для растений // Изв. Томск. политех. ун-та. 2003. Т. 306. № 3. С. 56–59.
10. *Титова В.И., Забегалов Н.В.* Сравнительное изучение влияния цеолита и минеральных удобрений на продуктивность зерновых культур и агрохимическую характеристику светло-серой лесной легкосуглинистой почвы // Почвовед. и агрохим. 2014. № 1 (52). С. 190–198.
11. *Солдатов В.С., Ионова О.В., Езубец А.П., Косандрович С.Ю., Вонсович Н.В.* Безнитратный питательный субстрат для растений на основе клиноптилолита // Докл. НАН Беларуси. 2019. Т. 63. № 1. С. 55–60.
12. *Солдатов В.С., Косандрович С.Ю., Ионова О.В., Езубец А.П., Вонсович Н.В.* Выращивание салата листового (*Lactuca sativa* L.) сорта Афицион на безнитратном цеолитном субстрате // Агрохимия. 2020. № 3. С. 31–36.
13. *Курбанов С.А.* Земледелие. М.: Изд-во “Юрайт”, 2020. 274 с.
14. *Karlicic V., Zivanovic I., Matijasevic V., Niksic M., Rac V., Simic A.* Stimulation of soil microbiological activity by cliniptilolite: the effect on plant growth // Ratar. Povtr. 2017. V. 54 (3). P. 117–123.
15. *Weatherley L.R., McVeigh R.J.* The enhancement of ammonium ion removal onto columns of clinoptilolite in the presence of nitrifying bacteria, In Ion exchange at the millennium. L.A. Greig, Imperial College Press, 2000. 141 p.

Cultivation of Leaf Lettuce *Lactuca sativa* L. on Mixtures of Zeolite Substrate with Bare and Fertilized Grounds

V. S. Soldatov[a,#], A. P. Ezubets[a], O. V. Ionova[a], and S. U. Kosandrovich[a]

[a] *Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus Surganov str. 13, Minsk 220072, Republic of Belarus*

[#] *E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by*

In laboratory conditions, several variants of using the zeolite substrate Zion® in the cultivation of leaf lettuce *Lactuca sativa* L. were tested in pot experiments: 1 – a pure substrate with a different granulometric composition and its mixture with neutralized high-moor peat; 2 – 2–5% additives to commercial nutrient peat; 3 – small additives (0.3–1.5% vol.) to fertilized and non-fertilized neutralized peat, sand and natural sod-podzolic soil. It was found that the best properties are obtained by a substrate with a particle size of 0.7–3 mm; the greatest fertility is a mixture of zeolite substrate with 10% neutralized peat; regardless of the nature of the main soil. Adding Zion to the pot causes an increase in the yield of the above–ground mass of plants on average by 2 grams per gram of zeolite substrate.

Key words: zeolite substrate, lettuce *Lactuca sativa*, nutrient soil additions.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 55–64

Регуляторы роста растений

УДК 631.8:635.1/.8

ВЛИЯНИЕ 24-ЭПИБРАССИНОЛИДА НА РОСТ, СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ, ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ И АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ ТОМАТА

© 2021 г. А. Н. Дерябин[1,*], Т. А. Суворова[1], С. В. Сычева[2], С. Н. Деревщюков[2]

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

[2] Воронежская овощная опытная станция – филиал Федерального научного центра овощеводства
369116 Воронежская обл., Верхнехавский р-н, п. НИИОХ, ул. Садовая, 3а, Россия

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

Поступила в редакцию 02.10.2019 г.
После доработки 18.06.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

Исследовали реакцию растений томата (*Solanum lycopersicum* Mill.) сортов Яхонт (среднеранний) и Кулон (скороспелый), на применение регулятора роста 24-эпибрассинолида (24-ЭБЛ) в концентрации 12.5 мкг/л, при действии низких положительных температур (НПТ). Предпосевная обработка семян 24-ЭБЛ не влияла на рост осевых органов проростков, но при действии НПТ оказала более выраженное антистрессовое действие на прорастание семян томата сорта Яхонт. 24-ЭБЛ на фоне НПТ способствовал увеличению содержания фотосинтетических пигментов в растениях сорта Кулон, а сорта Яхонт – сохранению их исходно высокого содержания. При НПТ листья растений томата сорта Кулон показали бóльшую отзывчивость на экзогенное (предпосевная обработка семян и/или опрыскивание растений за 1 сут до охлаждения) применение 24-ЭБЛ, что выражалось в снижении интенсивности процесса перекисного окисления липидов (ПОЛ). В этих условиях растения томата сорта Яхонт на 24-ЭБЛ реагировали сдержанно, о чем свидетельствовало отсутствие в их листьях достоверных изменений в интенсивности ПОЛ. 24-ЭБЛ не влиял на уровень антиоксидантной активности экстрактов листьев, при этом у сорта Яхонт он был исходно в 2 раза больше, чем у сорта Кулон. Сделан вывод, что меньшая отзывчивость растений томата сорта Яхонт на применение 24-ЭБЛ на фоне НПТ обусловлена их генетически детерминированной более высокой холодоустойчивостью, чем сорта Кулон.

Ключевые слова: Solanum lycopersicum, 24-эпибрассинолид, низкая температура, перекисное окисление липидов, 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил, фотосинтетические пигменты, холодоустойчивость.

DOI: 10.31857/S0002188121020058

ВВЕДЕНИЕ

В начальный период выращивания теплолюбивых культур (огурца, томата и др.) часто происходят резкие перепады дневных и ночных температур, а также кратковременные ночные заморозки, которые повреждают растения, замедляют их рост и развитие, приводят к снижению продуктивности. Одним из приемов снижения повреждающего действия абиотических стресс-факторов, в т.ч. низких температур, на растения является использование синтетических регуляторов роста, обладающих антистрессовой активностью [1–4].

Регулятор роста 24-эпибрассинолид (**24-ЭБЛ**) является синтетическим аналогом природного фитогормона брассиностероида и в ходе онтогенеза растений проявляет не только высокую регуляторную активность в отношении многих физиологических процессов (деления клеток, прорастания семян, ризогенеза, фотосинтеза, синтеза белков и нуклеиновых кислот и др.), но также повышает устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды [4–9]. 24-ЭБЛ регулирует внутриклеточные физиологические процессы во взаимодействии с эндогенными фитогормонами [10], поддерживает баланс между активными формами кислорода (**АФК**) и антиоксидантами [11] и индуцирует системную устойчивость растительного организма [8].

Томат – одна из основных сельскохозяйственных культур, которая по объему товарного производства и площади выращивания занимает 10-е место в мире [12]. В литературе имеются

сведения о полифункциональном действии 24-ЭБЛ на томаты. Показано, что при применении 24-ЭБЛ повышались энергия прорастания и всхожесть семян [2, 13], биометрические показатели растений в фазе массового плодоношения [14], размер и масса плодов [2], урожайность [15–17], устойчивость растений к серой гнили [6], тяжелым металлам (Ni) [18], засухе [19]. Работы, в которых изучали реакцию растений томата на 24-ЭБЛ при действии низких положительных температур (**НПТ**), единичны. Например, опрыскивание 50-суточных растений томата раствором 24-ЭБЛ в последействии охлаждения способствовало усилению функционирования антиоксидантной системы и повышению содержания пролина в листьях [20]. Холодовое повреждение тканей плодов томата было менее выражено при предобработке их 24-ЭБЛ [21]. Вместе с тем при оценке эффективности действия 24-ЭБЛ на растения некоторые авторы отмечали неодинаковую реакцию разных сортов, особенно на фоне неблагоприятных факторов среды, что могло быть связано с различным гормональным статусом, антиоксидантной активностью тканей и др. [4, 16, 17, 20]. Например, сортовая специфичность действия 24-ЭБЛ выявлена при определении активностей антиоксидантных ферментов у пшеницы на фоне солевого стресса [22] и у томата при действии НПТ [20]. У проростков озимой пшеницы эндогенный уровень 24-ЭБЛ зависел от степени морозостойкости сорта [23]. Предпосевная обработка семян пшеницы 24-ЭБЛ способствовала повышению в условиях засухи интенсивности фотосинтеза в растениях засухоустойчивого сорта Саратовская 29 и не влияла на этот показатель у неустойчивого сорта Энита [24].

Цель работы – изучение физиолого-биохимических реакций 2-х сортов томата, различающихся по скороспелости, на применение 24-ЭБЛ на фоне действия НПТ. В задачи исследования входила оценка влияния экзогенного 24-ЭБЛ на сорта томатов по следующим показателям: всхожесть семян, морфометрические параметры осевых органов, содержание в листьях фотосинтетических пигментов, интенсивность перекисного окисления липидов (**ПОЛ**) и антиоксидантная активность (**АОА**) экстрактов листьев.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были семена и молодые растения томата *Solanum lycopersicum* Mill. сортов Яхонт и Кулон селекции Воронежской овощной опытной станции. Растения обоих сортов имеют компактный детерминантный тип куста, но различаются по скороспелости: сорт Яхонт – среднеранний, тогда как сорт Кулон – скороспелый [25].

В работе использовали препарат эпин-Экстра (ННПП НЭСТ М, Россия), содержащий в качестве действующего вещества синтетический брассиностероид 24-ЭБЛ в концентрации 25 мг/л. Известно, что предпосевная обработка семян и опрыскивание вегетирующих растений раствором 24-ЭБЛ являются более эффективными способами, по сравнению с его внесением в почву [11]. В наших опытах 1 г семян томатов замачивали в водном растворе препарата эпин-Экстра в концентрации 0.5 мл/л (концентрация 24-ЭБЛ – 12.5 мкг/л) в течение 2-х ч. Контролем служила обработка семян дистиллированной водой. Семена проращивали в чашках Петри при 22 ± 0.5°С в темноте. Каждый вариант включал 4 повторности, по 100 семян в каждой. На 5-е сут оценивали энергию прорастания семян, на 10-е сут – их всхожесть, и измеряли длину осевых органов (корня и побега). Оценку биометрических показателей в каждом варианте проводили на 35–40 проростках.

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилл *а* (**Хл *а***), хлорофилл *б* (**Хл *б***) и каротиноиды (***кар***)) в листьях томатов определяли спектрофотометрическим методом, при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения Хл *а*, Хл *б* и *кар* в 80%-ном растворе ацетона – 663, 646 и 470 нм соответственно. Концентрации пигментов рассчитывали по следующим формулам:

$$C_{кар} = (1000D_{470} - 3.27C_a - 104C_b)/198,$$

$$C_a = 12.21D_{663} - 2.81D_{646},$$

$$C_б = 20.13D_{646} - 5.03D_{663},$$

где C_a, $C_б$, $C_{кар}$ – концентрации Хл *а*, Хл *б* и каротиноидов, мг/мл [26]. Содержание пигментов выражали в мг/г сухой массы листьев. Долю хлорофиллов в светособирающем комплексе (**ССК**) рассчитывали по формуле: ССК (%) = (Хл *б* + 1.2 × × Хл *б*)/(Хл *а* + Хл *б*) × 100, учитывая, что весь Хл *б* находится в ССК, а соотношение Хл *а*/Хл *b* в нем равно 1.2 [27].

Содержание сухого вещества в листьях определяли после их высушивания в термостате при температуре 100–105°С до постоянной массы и выражали в % исходной сырой массы навески.

Оценку холодоустойчивости сортов томата проводили двумя способами: по прорастанию семян при НПТ и по интенсивности свободнорадикальных процессов в листьях растений. По первому способу контрольные и обработанные 24-ЭБЛ семена помещали в чашки Петри на фильтро-

вальную бумагу, увлажненную дистиллированной водой, и проращивали при 10 ± 0.5°C в темноте в течение 25 сут. Каждый вариант включал 4 повторности, по 100 семян в каждой. Долю проросших при НПТ семян определяли каждые 5 сут.

По второму способу контрольные и обработанные 24-ЭБЛ семена высаживали в вазоны с субстратом на основе верхового торфа Агробалт-С (Росторфинвест, Россия) и проращивали в течение 3-х нед при 22 ± 0.5°C и 16-часовом фотопериоде с интенсивностью освещения 100 мкмоль квантов/(м^2 с), лампы OSRAM L 80W/640 (ОСРАМ, Смоленск, Россия). Растения охлаждали в климатической камере MIR-153 (Sanyo, Япония), в темноте. Использовали кратковременное (15 мин) охлаждение при 4 ± 0.5°C и длительное (24 ч) при 2 ± 0.5°C, при этом за 1 сут до охлаждения половину вазонов с растениями каждого варианта опрыскивали водным раствором препарата эпин-Экстра в концентрации 0.5 мл/л (концентрация 24-ЭБЛ – 12.5 мкг/л).

Холодоустойчивость растений оценивали по накоплению в листьях малонового диальдегида (**МДА**) – индикатора интенсивности процесса перекисного окисления липидов (ПОЛ). МДА в реакции с 2-тиобарбитуровой кислотой образует стойкий окрашенный триметиновый комплекс с максимумом поглощения при 532 нм. Неспецифическую адсорбцию определяли при длине волны 600 нм. Оптическую плотность растворов измеряли на спектрофотометре Genesys 10 UV (Termo Electron Corporation, США) с последующим пересчетом в концентрацию по величине молярной экстинкции ($\varepsilon = 1.56 \times 10^5$ см$^{-1}$ моль$^{-1}$). Количество МДА рассчитывали в мкмоль/г сырой массы листьев [28]. Опыты проводили трижды в 3-х аналитических повторностях, каждая из которых включала навеску листьев, взятых из среднего яруса 3–4-х растений.

Антиоксидантную активность (**АОА**) экстрактов листьев томата анализировали по оптической плотности в реакции со стабильным радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (**ДФПГ**) по методу [29]. Навеску листьев массой 1 г гомогенизировали в 10 мл 96%-ного этилового спирта и центрифугировали при 1500g в течение 15 мин. К 2 мл экстракта добавляли 1 мл 200 мкМ ДФПГ в 50%-ном этаноле, инкубировали в течение 30 мин при 21–23°C, после чего измеряли оптическую плотность на спектрофотометре в кюветах с толщиной поглощающего слоя 10 мм, при длине волны 517 нм против 50%-ного этанола. Радикал ДФПГ, взаимодействуя с молекулой антиоксиданта, переходит в нерадикальную форму, что сопровождается исчезновением максимума поглощения при 517 нм и изменением оптической плотности раствора [30]. Степень ингибирования ДФПГ (в %) рассчитывали по формуле:

степень ингибирования ДФПГ (%) = $[(A_o - (A - A_b)/A_o) \times 100]$, где A – оптическая плотность экстракта с ДФПГ, A_o – оптическая плотность ДФПГ без экстракта, A_b – оптическая плотность экстракта без ДФПГ [31].

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили с использованием программы T-test (ISI, США). Значимость различий между вариантами оценивали по *t*-критерию Стьюдента для независимых выборок. В таблицах и на рисунках представлены средние арифметические величины и их стандартные ошибки, достоверные при 95%-ном уровне значимости. Различия средних между вариантами и сортами отмечены разными надстрочными латинскими буквами. В статье обсуждают только величины, достоверные при $P \le 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты влияния предпосевной обработки семян томата 24-ЭБЛ на энергию прорастания и их всхожесть, а также рост осевых органов (корень, побег) представлены в табл. 1. Из представленных данных видно, что всхожесть семян сорта Кулон в контрольном варианте была выше на 29%, чем сорта Яхонт. В варианте с предпосевной обработкой семян 24-ЭБЛ у сорта Яхонт энергия прорастания была на 15% больше, чем в контроле. Однако высокие (98–99%) показатели энергии прорастания и всхожести семян сорта Кулон не позволили оценить действие 24-ЭБЛ на их посевные качества.

Сорта томата различались по биометрическим показателям (рост осевых органов) проростков: у сорта Кулон в контрольном варианте длина побега была больше на 35%, а корня меньше на 20%, чем у сорта Яхонт. Важно отметить отсутствие влияния 24-ЭБЛ на рост осевых органов проростков у обоих сортов томата. В литературе имеются сведения о том, что брассиностероиды, оказывая стимулирующее действие на прорастание семян, слабо влияют на линейный рост органов растений [32, 33].

В литературе 24-ЭБЛ характеризуется как регулятор роста, снижающий негативное действие низкотемпературного стресс-фактора у различных видов растений [2–4, 6, 8–10]. Установлено, что стресс-защитный эффект 24-ЭБЛ обусловлен адаптивными изменениями количественного со-

Таблица 1. Влияние предпосевной обработки семян томата регулятором роста 24-ЭБЛ на всхожесть и рост осевых органов проростков, на 10-е сут

Вариант	Энергия прорастания (5-е сут)	Всхожесть	Длина, мм	
	%		корня	побега
Сорт Яхонт				
Контроль	52.3 ± 1.5[a]	70.3 ± 0.8[c]	56.1 ± 3.1[g]	29.7 ± 1.1[h]
24-ЭБЛ	67.2 ± 1.4[b]	77.0 ± 0.9[d]	55.6 ± 2.7[g]	26.5 ± 1.3[h]
Сорт Кулон				
Контроль	98.0 ± 0.4[e]	99.0 ± 0.2[f]	46.3 ± 4.2[i]	40.5 ± 2.3[j]
24-ЭБЛ	98.2 ± 0.3[e]	99.0 ± 0.4[f]	46.1 ± 2.0[i]	40.0 ± 1.6[j]

Примечание. В каждом столбце величины, достоверно различающиеся при 95%-ном уровне значимости, отмечены разными надстрочными латинскими буквами.

става и баланса фитогормонов, а также повышенным уровнем экспрессии генов стрессового ответа, кодирующих белки холодового шока [32, 34]. Например, обработанные 24-ЭБЛ растения перца при действии НПТ имели стабильные фотосинтетические показатели, более высокие активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы (**СОД**), пероксидазы, каталазы и аскорбат-пероксидазы), накапливали больше пролина, растворимых сахаров, белка, а их ткани содержали меньше МДА – маркера окислительного стресса [35].

Принимая во внимание тот факт, что томат относится к теплолюбивым растениям, диапазон оптимальных температур для которых составляет 22 ± 7°C (при температуре <15°C растения не цветут, а при температуре <8°C прекращают рост) [12], для опытов по изучению стресс-протекторного действия 24-ЭБЛ на прорастание семян использовали температуру 10 ± 0.5°C. Согласно полученным данным (рис. 1), при НПТ семена томата прорастали медленнее, чем при 22 ± 0.5°C (табл. 1). Если у сорта Яхонт в контроле первые проросшие семена появились на 10-е сут, а в варианте с обработкой 24-ЭБЛ – на 5-е сут, то у сорта Кулон прорастание семян началось на 10-е сут, независимо от варианта (рис. 1). Следовательно, применение 24-ЭБЛ оказало более выраженное антистрессовое действие на прорастание семян томата сорта Яхонт, что проявилось в их быстром и дружном прорастании, в отличие от сорта Кулон. Предположили, что сорт Яхонт проявил себя как более устойчивый к НПТ, тогда как сорт Кулон – как менее холодоустойчивый.

Известно, что у теплолюбивых растений при действии НПТ процесс фотосинтеза подавляется в первую очередь, при этом одним из параметров, используемых в качестве индикатора фотосинтетической активности, является количественный состав пигментов [36]. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях является очень чувствительным показателем к действию НПТ. Результаты влияния предпосевной обработки семян 24-ЭБЛ на пигментный состав листьев растений томата при оптимальных температурных условиях и после 24 ч экспозиции при 2 ± 0.5°C в темноте представлены в табл. 2. Согласно полученным данным, до охлаждения контрольные растения обоих сортов не различались по содержанию пигментов, однако в варианте с применением 24-ЭБЛ у сорта Яхонт содержание Хл *а* и Хл *б* было больше на 23 и 29% соответственно по сравнению с сортом Кулон. Показатель Хл (*а* + *б*) и суммарное содержание пигментов у сорта Яхонт также были больше на 24% по сравнению с сортом Кулон.

НПТ способствовала некоторому снижению содержания хлорофиллов в листьях контрольных растений томата сорта Кулон, тогда как у сорта Яхонт, их содержание наоборот, возросло почти на треть. При применении 24-ЭБЛ и в последействии охлаждения у сорта Кулон наблюдали достоверное увеличение содержания Хл *а* и Хл *б*, на 40 и 20% соответственно. У обоих сортов после охлаждения в вариантах с 24-ЭБЛ, а также у контрольных растений сорта Яхонт содержание Хл *а* оставалось на высоком уровне. Отсутствие снижения содержания хлорофиллов у растений томата сорта Яхонт свидетельствовало о пониженной чувствительности их фотосинтетического аппарата к холоду. Данный факт мог свидетельствовать о возможной сбалансированной работе фотосинтетического аппарата (в частности, фотосистемы II) в последействии охлаждения, учитывая, что именно Хл *а* является преобразователем солнечной энергии, тогда как другие пигменты осуществляют ее поглощение и миграцию. Подобные изменения, связанные с увеличением содержания хлорофиллов и фотосинтетической активности листьев на фоне НПТ наблюдали у растений перца, предобработанных раствором 24-ЭБЛ [37].

При оптимальной температуре выращивания сорта томатов не различались по содержанию каротиноидов в листьях. После охлаждения в варианте с предобработкой семян 24-ЭБЛ содержание каротиноидов у сорта Кулон возросло на 50%, тогда как у сорта Яхонт оставалось на уровне неохлажденного варианта. Следует отметить, что в этих условиях содержание каротиноидов в ли-

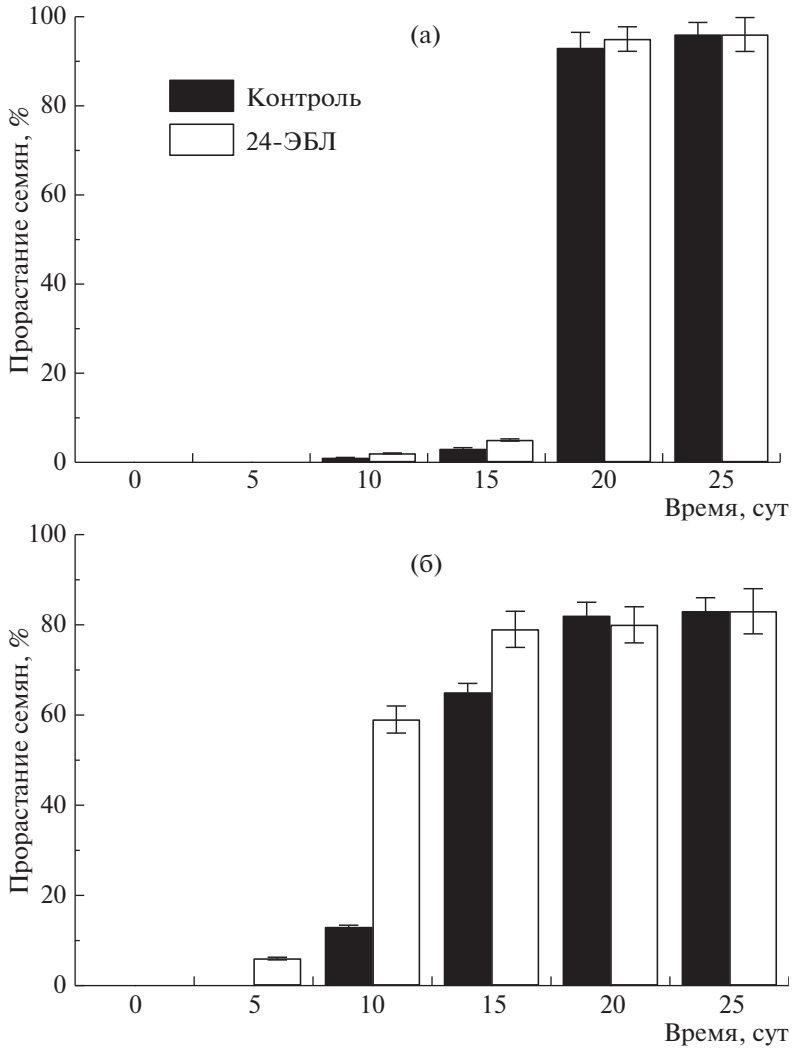

Рис. 1. Влияние предпосевной обработки семян томата 24-ЭБЛ на их прорастание при 10 ± 0.5°С, %: (а) – сорт Кулон, (б) – сорт Яхонт.

стьях контрольных растений томата сорта Яхонт возросло на 26% по сравнению с неохлажденным вариантом. У обоих сортов предобработка семян 24-ЭБЛ на фоне НПТ способствовала увеличению в листьях суммарного содержания пигментов более чем на 40% (рис. 2). В этих условиях сорт Яхонт показал меньшую отзывчивость на применение 24-ЭБЛ: содержание пигментов в листьях оставалось на уровне контрольного варианта.

При оптимальных температурных условиях сорта не различались по такому показателю, как доля Хл *б* в ССК, тогда как в вариантах с применением 24-ЭБЛ он был больше – на 8% у сорта Кулон и на 13% у сорта Яхонт. После охлаждения доля Хл *б* в ССК снижалась у обоих сортов, а в вариантах с применением 24-ЭБЛ оставалась на уровне неохлажденного контроля. Следовательно, предобработка семян томата 24-ЭБЛ оказала существенное влияние на содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений, при этом реакция сортов была неодинаковой. При оптимальных температурных условиях в варианте с 24-ЭБЛ более выраженные изменения в пигментном составе, связанные с увеличением содержания хлорофиллов, наблюдали у сорта Яхонт. При действии НПТ установлен стресс-защитный эффект 24-ЭБЛ на растения томата, направленный на адаптационные структурные изменения фотосинтетического аппарата, проявившиеся у сорта Кулон в виде увеличения содержания фотосинтетических пигментов, тогда как у сорта Яхонт – в сохранении их исходно высокого содержания на уровне неохлажденных растений.

Одной из ранних неспецифических реакций растительной клетки на охлаждение является ин-

Таблица 2. Влияние предпосевной обработки семян 24-ЭБЛ на содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений томата в норме (22 ± 0.5°C) и после охлаждения при 2± 0.5°C в течение 24 ч, мг/г сухой массы

Показатель	Варианты			
	контроль	24-ЭБЛ	контроль	24-ЭБЛ
	22 ± 0.5°C		2 ± 0.5°C, 24 ч	
Хл *а*	$\frac{10.6 \pm 0.5^{a}}{9.9 \pm 1.2^{a}}$	$\frac{9.9 \pm 0.8^{a}}{12.2 \pm 1.3^{b}}$	$\frac{9.9 \pm 0.9^{a}}{12.8 \pm 0.6^{b}}$	$\frac{13.8 \pm 0.8^{b}}{14.6 \pm 1.7^{b}}$
Хл *б*	$\frac{3.7 \pm 0.3^{c}}{3.4 \pm 0.3^{c}}$	$\frac{3.8 \pm 0.2^{c}}{4.9 \pm 0.6^{d}}$	$\frac{3.3 \pm 0.1^{c}}{4.4 \pm 0.1^{d}}$	$\frac{5.0 \pm 0.5^{d}}{5.1 \pm 0.8^{d}}$
Каротиноиды	$\frac{2.4 \pm 0.1^{e}}{2.2 \pm 0.3^{e}}$	$\frac{2.1 \pm 0.1^{e}}{2.6 \pm 0.4^{e}}$	$\frac{2.3 \pm 0.2^{e}}{3.3 \pm 0.1^{f}}$	$\frac{3.3 \pm 0.2^{f}}{2.6 \pm 0.5^{ef}}$
Хл (*а* + *б*)	$\frac{14.2}{13.3}$	$\frac{13.7}{17.1}$	$\frac{13.8}{17.2}$	$\frac{18.8}{19.6}$
Доля Хл ССК, % от Хл (*а* + *б*)	$\frac{57.0}{55.9}$	$\frac{61.7}{63.6}$	$\frac{54.5}{56.3}$	$\frac{58.9}{56.6}$

Примечание. Над чертой – сорт Кулон, под чертой – сорт Яхонт.

тенсификация окислительных процессов с участием АФК, накопление которых усиливает процесс ПОЛ мембран. МДА является одним из конечных продуктов ПОЛ и служит индикатором функционального состояния клеточных мембран [28]. Наши исследования показали, что в норме (без охлаждения) сорта томата не различались по содержанию МДА в листьях (рис. 3). Однако в вариантах с применением 24-ЭБЛ у сорта Кулон, в отличие от сорта Яхонт, наблюдали достоверное снижение содержания МДА. Различные режимы охлаждения способствовали накоплению МДА в листьях контрольных растений сорта Кулон, тогда как у сорта Яхонт этот показатель оставался на уровне неохлажденного контрольного варианта. Таким образом, при использовании 24-ЭБЛ (предпосевная обработка семян 24-ЭБЛ или предпосевная обработка семян + опрыскивание растений 24-ЭБЛ за 1 сут до охлаждения) содержание МДА в листьях растений сорта Кулон снижалось, тогда как у сорта Яхонт не изменялось. При НПТ растения томата сорта Кулон показали бóльшую отзывчивость на экзогенное применение 24-ЭБЛ, что выражалось в снижении у них интенсивности процесса ПОЛ. В этих условиях растения томата сорта Яхонт на 24-ЭБЛ реагировали сдержанно, о чем свидетельствовало отсутствие в их листьях достоверных изменений в содержании МДА относительно неохлажденного контроля. Полученные результаты подтверждают обнаруженные ранее (рис. 1) сортовые различия в

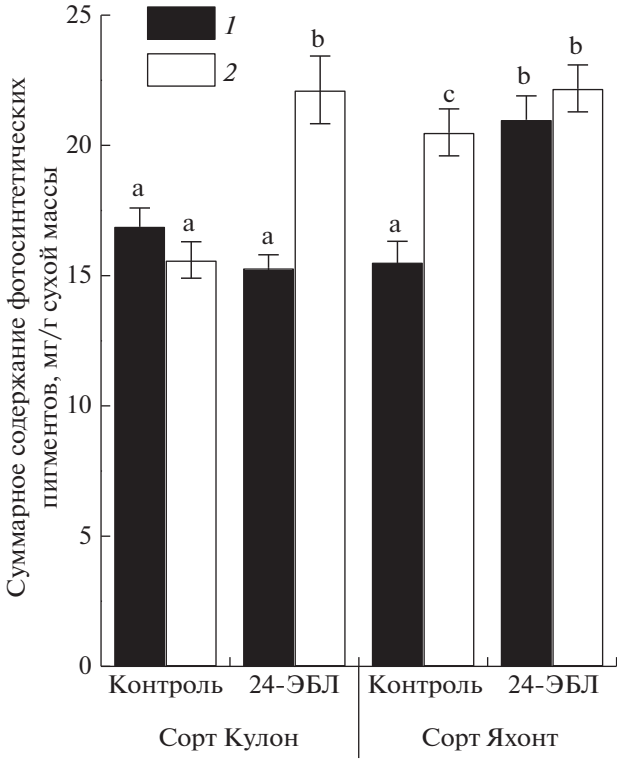

Рис. 2. Влияние предпосевной обработки семян 24-ЭБЛ на суммарное содержание фотосинтетических пигментов (Хл *а*, Хл *б*, каротиноиды) в листьях растений томата сортов Кулон и Яхонт при 22 ± 0.5°C (*1*) и после охлаждения при 2 ± 0.5°C в течение 24 ч (*2*). Достоверные различия средних величин при 95%-ном уровне значимости отмечены разными латинскими буквами. То же на рис. 3.

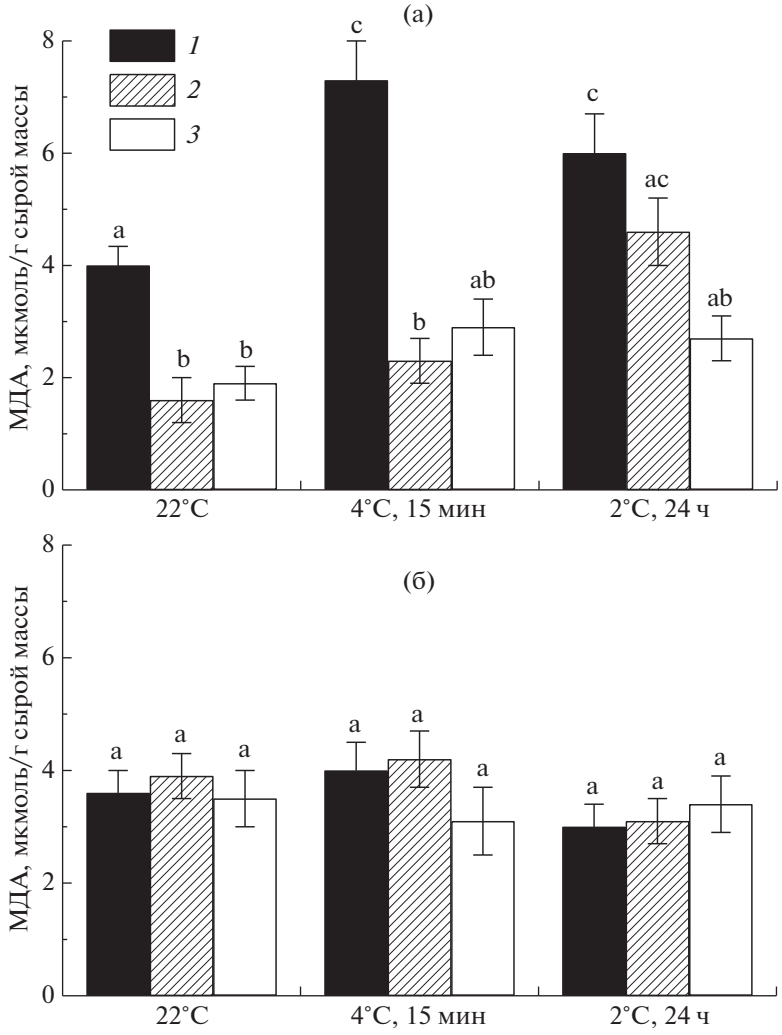

Рис. 3. Влияние экзогенного 24-ЭБЛ на содержание МДА в листьях растений (возраст 3 нед) томата сортов Кулон (а) и Яхонт (б) при действии пониженных температур: *1* – контроль (вода), *2* – семена перед посадкой обработаны 24-ЭБЛ, *3* – семена перед посадкой, а также растения за 1 сут до охлаждения обработаны 24-ЭБЛ.

холодоустойчивости: растения томата сорта Яхонт оказались более устойчивыми к охлаждению, чем растения сорта Кулон. Следовательно, при действии НПТ более высокая отзывчивость томата растений сорта Кулон на применение 24-ЭБЛ была обусловлена их пониженной холодоустойчивостью, чем сорта Яхонт. Есть основания полагать, что повышенная устойчивость растений томата сорта Яхонт к охлаждению определялась наличием у них более эффективной антиоксидантной системы, чем у растений сорта Кулон. Для проверки данного предположения была проведена оценка АОА экстрактов листьев методом, основанным на взаимодействии стабильного хромоген-радикала ДФПГ с веществами (фенольные соединения, тиолы, аскорбиновая кислота и др.), проявляющих антиоксидантную активность [38]. Согласно методу, чем больше доля ингибирования ДФПГ-радикалов, тем больше АОА растительной ткани. Установлено, что экстракты листьев сортов томата различались по величине АОА, при этом доля ингибирования ДФПГ-радикалов у них была сходна в контроле и в варианте с применением 24-ЭБЛ (рис. 4). У сорта Кулон АОА экстрактов листьев была в 2 раза меньше, чем у сорта Яхонт. Таким образом, оценка АОА экстрактов листьев с помощью стабильного радикала ДФПГ не выявила влияние 24-ЭБЛ на уровень низкомолекулярных антиоксидантов, что указывало на возможное действие этого регулятора роста на ферментативную составляющую антиоксидантной системы. В литературе имеются сведения о том, что у растений томата экзогенный 24-ЭБЛ повышал активность анти-

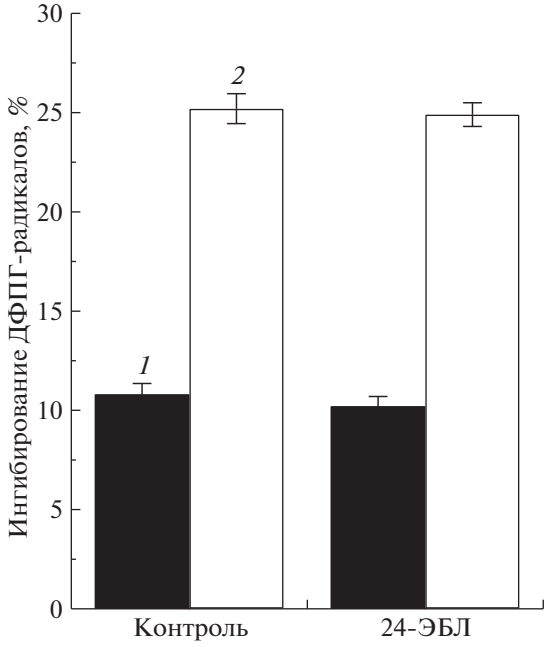

Рис. 4. Влияние предпосевной обработки семян 24-ЭБЛ на антиоксидантную активность экстрактов листьев растений томата в реакции со стабильным хромоген-радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (ДФПГ): *1* – сорт Кулон, *2* – сорт Яхонт.

оксидантных ферментов, при этом устойчивые к холоду сорта имели более высокие активности, чем неустойчивые [20]. Анализ изменений адаптивного потенциала разных сортов томата при применении препарата эпин-Экстра (0.1%-ный раствор) показал, что основной (более 50%) вклад в результаты опыта вносили особенности генотипов разных сортов [17]. Использованный в исследованиях сорт Яхонт в условиях агроценоза показал меньшую отзывчивость на применение 24-ЭБЛ по сравнению с другими сортами томата [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, регулятор роста 24-ЭБЛ оказывал направленное влияние на отдельные этапы онтогенеза растений томата (прорастание семян, молодое растение), видимо, за счет мобилизации их генетических возможностей, что в итоге способствовало повышению их устойчивости к низким положительным температурам (НПТ). Данные по интенсивности окислительных процессов в листьях свидетельствовали о разной реакции сортов томата на 24-ЭБЛ в условиях действия НПТ: растения скороспелого сорта Кулон показали бóльшую отзывчивость, тогда как растения среднераннего сорта Яхонт на применение регулятора роста реагировали сдержанно. Применение 24-ЭБЛ приводило к более выраженным изменениям в пигментном составе у сорта Яхонт в отсутствии стресс-фактора, тогда как у сорта Кулон – при действии НПТ. 24-ЭБЛ не влиял на уровень антиоксидантной активности экстрактов листьев, при этом у сорта Яхонт он был в 2 раза выше, чем у сорта Кулон. Таким образом, одним из факторов, обусловливающих менее выраженную отзывчивость сорта Яхонт на обработку 24-ЭБЛ, являлось наличие у них более эффективной неферментативной антиоксидантной системы, чем у сорта Кулон. Следовательно, степень влияния 24-ЭБЛ на сорта томата была обусловлена уровнем их генетически детерминированной холодоустойчивости, который был выше у сорта Яхонт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Шаповал О.А., Вакуленко В.В., Прусакова Л.Д., Можарова И.П.* Регуляторы роста растений в практике сельского хозяйства. М.: ВНИИА, 2009. 59 с.
3. *Колмыкова Т.С., Лукаткин А.С.* Эффективность регуляторов роста растений при действии абиотических стрессовых факторов // Агрохимия. 2012. № 1. С. 83–94.
4. *Anwar A., Liu Y., Dong R., Bai L., Yu X., Li Y.* The physiological and molecular mechanism of brassinosteroid in response to stress: a review // Biol. Res. 2018. V. 51. P. 46–61.
5. *Singh I., Kumar U., Singh S.K., Gupta C., Singh M., Kushwaha S.R.* Physiological and biochemical effect of 24-epibrassinoslide on cold tolerance in maize seedlings // Physiol. Mol. Biol. Plants. 2012. V. 18. P. 229–236.
6. *Будыкина Н.П., Шибаева Т.Г., Титов А.Ф.* Влияние Эпина-экстра – синтетического аналога 24-эпибрассинолида на стрессоустойчивость и продуктивность растений огурца (*Cucumis sativus* L.) // Тр. Карел. НЦ РАН. 2012. № 2. С. 47–55.
7. *Ефимова М.В., Мануйлова А.В., Малофий М.К., Карташов А.В., Кузнецов Вл.В.* Влияние брассиностероидов на формирование защитных реакций проростков рапса в условиях засоления // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2013. № 1 (21). С. 18–128.
8. *Колупаев Ю.Е., Вайнер А.А.* Механизмы стресспротекторного влияния брассиностероидов на растения // Агрохимия. 2014. № 7. С. 69–84.
9. *Cui L., Zou Z., Zhang J., Zhao Y., Yan F.* 24-Epibrassinoslide enhances plant tolerance to stress from low temperatures and poor light intensities in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) // Funct. Integr. Genomics. 2016. V. 16. P. 29–35.

10. *Вакуленко В.В.* Регуляторы роста растений повышают стрессоустойчивость культур // Защита и карантин раст. 2015. № 2. С. 3–14.
11. *Tanveer M., Shahzad B., Sharma A., Khan E.A.* 24-Epibrassinolide application in plants: An implication for improving drought stress tolerance in plants // Plant Physiol. Biochem. 2019. V. 135. P. 295–303.
12. *Мухортов С.Я.* Частное овощеводство и грибоводство. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. 247 с.
13. *Гладышева О.В.* Влияние Эпин-экстра и Циркона на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян некоторых сортов томата // Научн. альманах. 2019. № 2-2(52). С. 115–118.
14. *Селиванова М.В., Романенко Е.С., Сосюра Е.А., Есаулко Н.А., Айсанов Т.С.* Продуктивность томата при применении микроэлементов и биологически активных веществ // Овощи России. 2017. Т. 4. С. 91–95.
15. *Деревщюков С.Н., Сычева С.В.* Применение регуляторов роста при выращивании томата // Защита и карантин раст. 2007. № 11. С. 37–38.
16. *Мухортов С.Я.* Динамика адаптивной способности агроценозов томата при применении регуляторов роста // Плодоводство и ягодоводство России. 2014. Т. 40. № 1. С. 217–220.
17. *Мухортов С.Я., Стазаева Н.В., Микулина Ю.С., Воробьев П.Н.* Адаптивные свойства агроценозов при применении фитогормонов // Вестн. Воронеж. ГАУ. 2016. № 2(49). С. 66–73.
18. *Nazir F., Hussain A., Fariduddin Q.* Interactive role of epibrassinolide and hydrogen peroxide in regulating stomatal physiology, root morphology, photosynthetic and growth traits in *Solanum lycopersicum* L. under nickel stress // Environ. Exp. Bot. 2019. V. 162. P. 479–495.
19. *Yuan G.F., Jia C.G., Li Z., Sun B., Zhang L.P., Liu N., Wang Q.M.* Effect of brassinosteroids on drought resistance and abscisic acid concentration in tomato under water stress // Sci. Horticult. 2010. V. 126. P. 103–108.
20. *Khan T., Fariduddin Q., Yusuf M. Lycopersicon esculentum* under low temperature stress: an approach toward enhanced antioxidants and yield // Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. V. 22. P. 14178–14188.
21. *Aghdam M.S., Asghari M., Farmani B., Mohayeji M., Moradbeygi H.* Impact of postharvest brassinosteroids treatment on PAL activity in tomato fruit in response to chilling stress // Sci. Horticult. 2012. V. 144. P. 116–120.
22. *Shahbaz M., Ashraf M., Athar H.R.* Does exogenous application of 24-epibrassinolide ameliorate salt induced growth inhibition in wheat (*Triticum aestivum* L.)? // Plant Growth Regul. 2008. V. 55. P. 51–64.
23. *Janeczko A., Pociecha E., Dziurka M., Jurczyk B., Libik-Konieczny M., Oklestkova J., Novak O., Pilarska M., Filek M., Rudolphi-Skorska E., Sadura I., Siwek A.* Changes in content of steroid regulators during cold hardening of winter wheat – steroid physiological/biochemical activity and impact on frost tolerance // Plant Physiol. Biochem. 2019. V. 139. P. 215–228.
24. *Прусакова Л.Д., Чижова С.И., Агеева Л.Ф., Голанцева Е.Н., Яковлев А.Ф.* Влияние эпибрассинолида и экоста на засухоустойчивость и продуктивность яровой пшеницы // Агрохимия. 2000. № 3. С. 50–54.
25. *Сычева С.В., Бухаров А.Ф., Деревщюков С.Н., Востриков В.В.* Селекция томата для открытого грунта Центрально-Черноземного Региона // Картофель и овощи. 2017. № 4. С. 37–40.
26. *Wellburn A.R.* The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution // J. Plant Physiol. 1994. V. 144. P. 307–313.
27. *Lichtenthaler H.K.* Chlorophylls and carotenoids pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymol. V. 148 / Ed. Colowick S.P., Kaplan N.O. San-Diego E.A., 1987. P. 350–382.
28. *Лукаткин А.С., Головановa В.С.* Интенсивность перекисного окисления липидов в охлажденных листьях теплолюбивых растений // Физиология растений. 1988. Т. 35. С. 773–780.
29. *Лукаткин А.С., Нарайкина Н.В.* Оценка воздействия температурных стрессоров на растения кукурузы по изменению антиоксидантной активности // Докл. РАСХН. 2011. № 5. С. 8–10.
30. *Kwon S.W., Hong S.S., Kim J.I., Ahn I.H.* Antioxidant properties of heat-treated *Hibiscus syriacus* // Изв. РАН. Сер. биол. 2003. Т. 30. С. 20–21.
31. *Кондратенко Е.И., Великородов А.В., Мохамад А.Э.С.А., Ломтева Н.А., Кондратенко К.Н.* Химический состав и антиоксидантная активность экстрактов семян *Nelumbo nucifera* // Химия раст. сырья. 2012. № 3. С. 115–120.
32. *Хрипач В.А., Лахвич Ф.А., Жабинский В.Н.* Брассиностероиды. Минск: Наука и техника, 1993. 287 с.
33. *Лукаткин А.С., Каштанова Н.Н., Духовскис П.* Влияние эпибрассинолида на термоустойчивость проростков кукурузы // Агрохимия. 2013. № 6. С. 24–31.
34. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Калимуллина З.Ф., Яхин И.А., Вахитов В.А., Чемерис А.В., Гималов Ф.Р., Матниязов Р.Т.* Антистрессовая активность регулятора роста растений Эпина-экстра // Докл. РАСХН. 2009. № 3. С. 25–27.
35. *Li J., Yang P., Gan Y., Yu J., Xie J.* Brassinosteroid alleviates chilling-induced oxidative stress in pepper by enhancing antioxidation systems and maintenance of photosystem II // Acta Physiol. Plant. 2015. V. 37. P. 222.
36. *Shu S., Tang Y., Yuan Y., Sun J., Zhong M., Guo S.* The role of 24-epibrassinolide in the regulation of photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of tomato seedlings under a combined low temperature and weak light stress // Plant Physiol. Biochem. 2016. V. 107. P. 344–353.
37. *Li J., Yang P., Kang J., Gan Y., Yu J., Calderyn-Urrea A., Jian L., Zhang G., Feng Z., Xie J.* Transcriptome analysis of pepper revealed a role of 24-epibrassinolide in response to chilling // Front. Plant Sci. 2016. V. 7. P. 1–16.
38. *Miliauskas G., Venskutonis P.R., Van Beek T.A.* Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts // Food Chem. 2004. V. 85. P. 231–237.

Influence of 24-Epibrassinolide on Growth, Content of Photosynthetic Pigments, Cold Resistance and Antioxidant Activity of Tomato Plants

A. N. Deryabin[a,#], T. A. Suvorova[a], S. V. Sycheva[b], and S. N. Derevshchyukov[b]

[a] *K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences Botanicheskaya ul. 35, Moscow 127276, Russia*

[b] *Voronezh Vegetable Experimental station – branch of the Federal Scientific Center for Vegetable Production NIIOKh, Verkhnekhavsky District, Voronezh region 369116, Russia*

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

The study is aimed at the research of the preparation of Epin-extra (0.025 g 24-epibrassinolide/L) influence on germinative quality, sprout biometrics and lipid peroxidation activity in the tomato (*Solanum lycopersicum* Mill., varieties Yakhont and Kulon) leaves at low temperatures. The efficiency of the exogenous use of the preparation for increasing the energy of germination and germinative quality of the seeds, as well as the cold resistance of tomato plants, has been shown. In this regard, being cultivated upon the low temperature the Yakhont variety required less treatment with a stress protector of the preparation than the Kulon variety. It has been found that during cooling, the stress-protective effect of the preparation was most pronounced in the Kulon plants, which are less resistant to low temperatures. It indicates the varietal specificity of the action of the plant growth regulator.

Key words: Solanum lycopersicum, 24-epibrassinolide, photosynthetic pigments, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, low temperature, lipids peroxidation, cold tolerance.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 65–70

Пестициды

УДК 632.951:635.21

ИМИДАКЛОПРИД И ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕМЕННЫХ ПОСАДОК КАРТОФЕЛЯ ОТ ТЛЕЙ

© 2021 г. О. В. Долженко[1], Т. В. Долженко[2,*]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, ш. Подбельского, 3, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 Санкт-Петербург–Пушкин, Петербургское ш., 2, Россия
**E-mail: dolzhenkotv@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.04.2020 г.
После доработки 17.05.2020 г.
Принята к публикации 10.08.2020 г.

Приведены результаты исследований биологической эффективности инсектицида из химического класса неоникотиноидов – имидаклоприда в виде концентрата суспензии (КС), содержащей 200 и 600 г д.в./л; водорастворимого концентрата (ВРК), содержащего 200 г д.в./л; водно-диспергируемых гранул (ВДГ), содержащих 700 г д.в./кг действующего вещества и водного раствора (ВР) – 0.1 г.д.в./л для защиты семенного картофеля от тлей – переносчиков вирусов. Использованы следующие технологии применения инсектицида: предпосадочная обработка клубней, обработка дна борозды одновременно с посадкой клубней, опрыскивание растений. Сделан вывод о высокой биологической эффективности (до 100%) имидаклоприда и возможности эффективного применения различных технологий внесения инсектицида против тлей на семенном картофеле как в открытом, так и в защищенном грунте.

Ключевые слова: картофель, вирусы, биологическая эффективность, тли-переносчики вирусов, инсектицид имидаклоприд.

DOI: 10.31857/S0002188120110034

ВВЕДЕНИЕ

Вирусные и вироидные болезни сильно снижают эффективность картофелеводства. По мнению Д. Шпаара [1], вирусные эпифитотии возникают в годы появления большого числа тлей-переносчиков, когда вирусы особенно сильно распространяются, что отрицательно сказывается на экономике семеноводства картофеля. Большинство афидофильных вирусов картофеля составляют неперсистентные вирусы, передающиеся на сравнительно недалекое расстояние при очень непродолжительном питании переносчиков на больных и здоровых растениях. Поскольку преобладающее число этих вирусов широко распространено в основных зонах картофелеводства, разработка мер защиты семенных посадок от их переносчиков является настоятельной необходимостью, и в этом случае основная роль принадлежит химическому методу [1, 2].

Наибольшее хозяйственное значение в качестве переносчиков вирусов в посадках картофеля имеют следующие виды тлей: *Myzodes persicae* Sulz., *Aphis nasturtii* Kalt., *Aphis frangulae* Kalt., *Macrosiphum euphorbiae* Thom., *Aulacorthum solani* Kalt [3–8]. Число видов тлей, регистрируемых в мире в качестве переносчиков вирусов, ежегодно возрастает, а некоторые исследователи [1, 9] считают, что любой вид тли можно рассматривать в качестве переносчика вирусной инфекции. Установлено, что период возможного заселения полей картофеля как разными видами тлей, так и их комплексом, может длиться до 9-ти и более недель. Оптимально в течение всего этого времени требуется обеспечить гибель тлей-мигрантов в семенных посадках при их первых попытках питаться на защищаемом растении, поскольку период от всходов картофеля до цветения характеризуется высокой чувствительностью к вирусам. Очень часто вредители питаются внутри свернутых листьев и в нижней части картофельного куста, что затрудняет активную работу препаратов контактного действия. Поэтому основными требованиями, предъявляемыми в данном случае к препаратам, являются высокая эффективность и продолжительность их афицидного действия, чтобы максимально сократить кратность обрабо-

ток. По этой же причине наиболее рациональным для защиты семенных посадок картофеля является использование инсектицидов системного действия [9–14].

В системе сертификации семян картофеля в Российской Федерации с 1 января 2018 г. введен новый межгосударственный стандарт ГОСТ 33996–2016 “Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества” [15–17]. В соответствии с ГОСТом, в семенном картофеле не допускается наличие возбудителей инфекционных болезней и вредителей, имеющих карантинное значение (рак картофеля, бурая бактериальная гниль, золотистая цистообразующая картофельная нематода, картофельная моль и др.); установлены дифференцированные нормы для контроля фитопатогенных вирусов на основе лабораторного тестирования листовых и клубневых проб в зависимости от ступени размножения оригинального семенного материала, включая исходный *in vitro* материал, миниклубни, первое полевое поколение из миниклубней и супер-суперэлиту. Для всех классов (поколений), относящихся к категории оригинального семенного материала, введены достаточно жесткие нормативные допуски по вирусам, вызывающим тяжелые формы морщинистой и полосчатой мозаики (**YBK**), скручивания листьев картофеля (**ВСЛК**) и вироида веретеновидности клубней (**ВВКК**). Наличие YBK и ВСЛК в исходном *in vitro* материале и миниклубнях не допускается. В первом полевом поколении из миниклубней предельно допустимая норма не должна превышать 0.5%, в супер–суперэлите – 1%. В отношении ВВКК для всех поколений установлен нулевой допуск.

Борьбу с вирусными болезнями картофеля необходимо проводить при семеноводстве картофеля на всех этапах: в лабораторных условиях, в защищенном грунте и в полевых условиях.

В течение длительного времени выращивание миниклубней было ориентировано на использование обогреваемых зимних грунтовых теплиц. Сегодня производители используют менее затратные технологии выращивания миниклубней в весенне-летнем обороте в условиях необогреваемых каркасных укрытий тоннельного типа с применением легких синтетических укрывных материалов.

Комплекс агроприемов, ограничивающих распространение вирусной и другой инфекции в полевых условиях [18], должен включать: обеспечение необходимой изоляции от других посадок картофеля более низких классов или посадок товарного картофеля, предпосадочную обработку клубней препаратами инсектицидно-фунгицидного действия, создание условий, наиболее благоприятных для быстрого роста и развития растений в первоначальный период вегетации, мониторинг активности популяций тлей, мигрирующих на посадках картофеля, регулярное проведение фитосортопрочисток, применение эффективных и экологически безопасных средств защиты растений в период вегетации, предуборочное удаление ботвы химическим или механическим способом при достижении оптимальной семенной товарности клубней с учетом динамики мигрирующих переносчиков вирусов (летающей генерации тлей). Система борьбы с вирусными болезнями картофеля должна быть основана на точных данных о переносчиках в каждых конкретных условиях выращивания семенного картофеля.

Так как с вирусными болезнями картофеля нельзя бороться прямым способом, их развитие надо предотвращать нарушением инфекционного цикла, элементами которого являются источник вируса, переносчик и растение-хозяин [1].

На основании вышесказанного, цель работы – оценка биологической эффективности и технологий применения имидаклоприда для защиты картофеля от тлей в условиях открытого и защищенного грунта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые опыты проводили в Ленинградской обл. в 2012–2019 гг. (ООО “Славянка-М”, Ленинградская плодоовощная опытная станция, опытное поле Санкт-Петербургского государственного аграрного университета) на семенных участках картофеля *Solanum tuberosum* L. сортов Невский, Удача, Ред Скарлет, Чароит. Тест-объект – имаго и личинки тлей (сем. Aphididae).

Варианты опыта: 1 – имидаклоприд в виде концентрата суспензии (КС), содержащей 200 и 600 г/л действующего вещества, 2 – водорастворимого концентрата (ВРК), содержащего 200 г/л действующего вещества, 3 – водно-диспергируемых гранул (ВДГ), содержащих 700 г/кг действующего вещества, 4 – готовый к применению препарат в виде водного раствора (ВР), содержащего 0.1 г/л действующего вещества, 5 – эталон (зарегистрированный, применяемый в практике препарат с высоким защитным эффектом), 6 – необработанный контроль. Размещение делянок рендомизированное, размер делянок 50 м^2, повторность четырехкратная. Способ применения инсектицида в зависимости от препаративной формы: предпосадочная обработка клубней, обработка дна борозды

одновременно с посадкой клубней, опрыскивание растений.

Показателем биологической эффективности препарата являлась величина снижения численности тлей относительно контроля при внесении обработанных клубней или обработке дна борозды в процессе посадки клубней и относительно исходной с поправкой на контроль при опрыскивании растений [19].

Проведение учетов в поле: подсчет имаго и личинок на 100 листьях, сорванных произвольно с разных ярусов растений в каждой повторности мелкоделяночного опыта. Сроки учетов зависели от способа применения инсектицида. При посадке обработанных клубней или обработке дна борозды в процессе посадки клубней: предварительный учет (определение срока появления тлей в контроле), 1-й учет – 3-и сут после появления тлей в контроле, 2-й учет – 7-е сут после появления тлей в контроле, последующие учеты с интервалом в 7 сут до десикации (скашивания) ботвы. При опрыскивании растений: предварительный учет (непосредственно перед обработкой), 1-й учет – на 3-и сут после обработки, 2-й учет – на 7-е сут после обработки, 3-й учет – на 14-е сут после обработки, последующие учеты – по необходимости.

Для наблюдений за появлением, динамикой численности и видовым составом тлей при выращивании миниклубней в теплицах учебно-опытного сада СПбГАУ применяли метод желтых чашек (сосудов Мерике) [5, 12, 13]. Данный метод дает возможность определить активность лета тлей и их видовой состав. Принцип метода заключается в установленной Мерике способности некоторых видов тлей лететь на желтый цвет. Сосуды, заполненные водой, размещали между опытными теплицами, между теплицами и лесополосой и внутри теплиц, где выращивали миниклубни картофеля.

Непосредственно в теплицах размещали по 2 ловушки – в начале и конце теплицы. Сбор насекомых проводили еженедельно утром, в одно и то же время. Насекомых из каждой ловушки помещали во флаконы с 70%-ным спиртом. Отловленный в ловушки энтомологический материал идентифицировали в лабораторных условиях (ВИЗР, старший научный сотрудник, канд. биол. наук М.Н. Берим).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К перспективным инсектицидам против вредителей картофеля относят современные препараты на основе действующих веществ из класса неоникотиноидов. Представителям данного химического класса свойственны высокая биологическая активность против широкого спектра вредителей сельскохозяйственных культур (в том числе и картофеля), достаточно низкие нормы применения, высокое системное и трансламинарное действие в растениях, умеренная стойкость в объектах окружающей среды. Одним из них является имидаклоприд, который обладает контактно-кишечным и системным действием. Имидаклоприд блокирует постсинаптические никотинэнергические рецепторы нервной системы вредных насекомых. В результате подавляется передача сигналов через центральную нервную систему вредителей, отчего они сначала теряют двигательную активность, затем прекращают питаться и погибают. Необходимо отметить, что имидаклоприд слабо проникает через гематоэнцефалический барьер млекопитающих. Вследствие этого неоникотиноиды очень токсичны для вредителей и умеренно или малотоксичны для млекопитающих. Коэффициент избирательности составляет >2000 [20–23].

Установлено, что на эффективность и уровень экологической безопасности средств защиты растений может существенно влиять технология их применения [10]. Применение имидаклоприда способом обработки дна борозды при посадке клубней картофеля и способом обработки клубней перед посадкой позволило минимизировать контакт препарата с воздухом, а затем и с нецелевыми организмами.

Оценка биологической эффективности имидаклоприда, КС (200 г/л) в регуляции численности тлей при обработке дна борозды при посадке клубней картофеля проведена по схеме: имидаклоприд, КС (200 г/л) – в нормах применения 0.5, 0.75 и 1.0 л/га, эталон – препарат актара, ВДГ (250 г/кг) – 0.6 кг/га, контроль без обработки. Инсектицид показал высокую биологическую эффективность (100%) в варианте с максимальной нормой применения 1.0 л/га в течение практически всего периода учетов. Лишь на 35-е сут после появления всходов показатель биологической эффективности находился на уровне 89.1% (рис. 1).

Оценка биологической эффективности имидаклоприда, КС (200 г/л) при его использовании для обработки клубней перед посадкой, проведена по схеме: имидаклоприд, КС (200 г/л) – в нормах применения 0.15, 0.2 и 0.25 л/т, эталон – препарат табу, ВСК (500 г/л) – 0.1 л/т и контроль без обработки. Инсектицид при этой технологии применения показал высокую биологическую эффективность (100%) в борьбе с тлями-переносчиками вирусов на картофеле в течение практи-

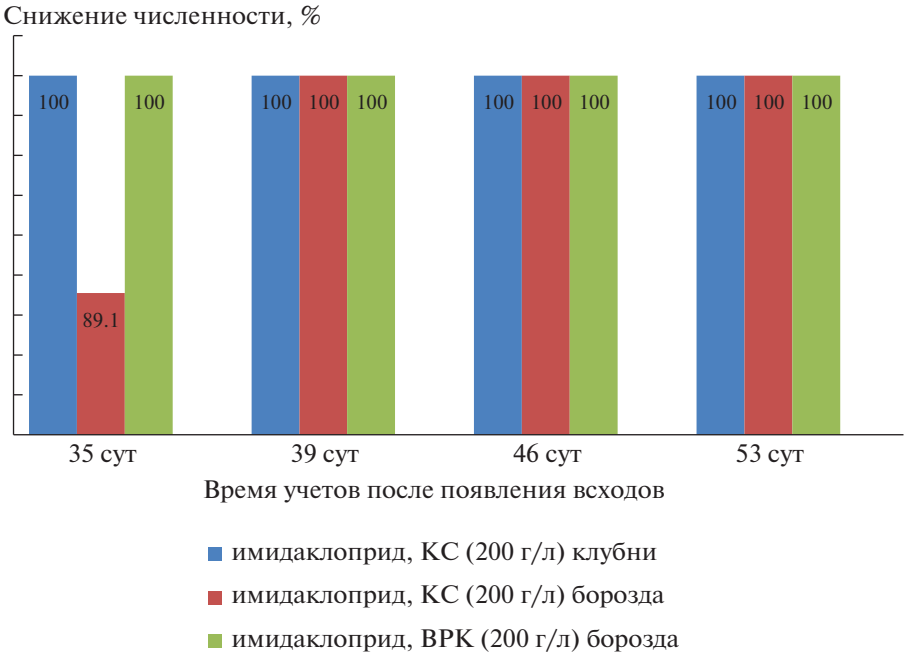

Рис. 1. Биологическая эффективность инсектицидов для защиты картофеля от тлей-переносчиков вирусов (максимальные нормы применения) (Ленинградская обл.)

чески всего периода учетов (рис. 1). Лишь на 39-е сут после появления всходов в вариантах с нормами применения 0.15 и 0.2 л/т показатель биологической эффективности находился на уровне 86.1%, на 46-е сут учетов в варианте с нормой применения 0.2 л/т этот показатель составил 70.0%.

Использование имидаклоприда в форме водорастворимого концентрата (ВРК), содержащего также 200 г/л инсектицида, при применении обработки дна борозды при посадке клубней проводили по схеме: имидаклоприд, ВРК (200 г/л) в нормах применения 0.5 и 1.0 л/га, эталон – препарат Актара, ВДГ (250 г/кг) – 0.6 кг/га и контроль без обработки. Биологическая эффективность, которую определяли по снижению численности тлей в зависимости от времени после появления всходов, в варианте с нормой применения 0.5 л/га в течение учетного периода менялась от 67.4 до 100%, при норме применения 1.0 л/га была равна 100% в течение всего периода учетов (рис. 1), не уступая эффективности эталонного препарата.

Предпосадочную обработку клубней проводили также концентратом суспензии (КС), но содержащей уже не 200, а 600 г имидаклоприда/л. Наблюдения за тлями в опытных вариантах начали с момента появления их на растениях картофеля. Первые особи тлей зафиксированы в контроле на 36-е сут после появления всходов. На 39-е сут после появления всходов тли были отмечены во всех вариантах. Высокая биологическая эффективность инсектицида была отмечена при всех нормах применения (табл. 1). Визуально отмечено, что в вариантах с применением инсектицидов тли, попадая на обработанные растения и начав питаться, через некоторое время погибали.

В период вегетации растений картофеля была проведена обработка растений инсектицидом с высоким содержанием имидаклоприда (водно-диспергируемые гранулы – ВДГ, 700 г/кг) в норме применения 0.125 кг/га. Учеты биологической эффективности проводили в течение 3-х нед после обработки: на 3-и, 7-е, 14-е и 21-е сут после обработки она составила 95.4, 79.4, 75.0 и 63.0% соответственно. Стоит отметить, что, несмотря на самое высокое содержание имидаклоприда, эффективность приема обработки растений в период вегетации уступала эффективности применения инсектицида двумя описанными выше способами.

Таким образом, представленные результаты позволили сделать вывод об универсальности препаратов на основе имидаклоприда и возможности эффективного применения различных технологий их внесения (с учетом экологичности) против тлей на картофеле.

Сложность применения инсектицидов при выращивании миниклубней картофеля в защищенном грунте заключается в том, что обработки против тлей-переносчиков вирусов необходимо

Таблица 1. Биологическая эффективность имидаклоприда, КС (600 г/л) в борьбе с тлями (сем. Aphididae) на картофеле (предпосадочная обработка клубней, Ленинградская обл.)

Вариант	Норма применения препарата, л/т	Снижение численности тлей относительно контроля по суткам учетов после появления всходов, %			
		39	43	50	57
Имидаклоприд, КС (600 г/л)	0.15	96.4	95.5	100	100
Имидаклоприд, КС (600 г/л)	0.25	100	95.5	100	100
Имидаклоприд, КС (600 г/л)	0.3	100	95.5	100	100
Эталон круйзер, СК (350 г/л)	0.2	100	90.9	86.9	100
$НСР_{01}$	–	7.7	2.1	1.6	0

проводить еженедельно, а препаратов в Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации [24], на данной культуре в теплице не существует. В статьях, опубликованных в различных журналах, можно найти не только химические, а даже и биологические препараты, рекомендованные авторами, но они никогда не были зарегистрированы не только на картофеле в защищенном грунте, но и на других культурах (картофин, вертициллин и т.п.) [6].

В настоящей работе изучили действие имидаклоприда, водный раствор (ВР) (0.1 г/л), разрешенного, с одной стороны, в борьбе с тлями на овощных и цветочных культурах защищенного грунта, а с другой стороны, – на картофеле открытого грунта для борьбы с колорадским жуком. Обработки в теплице проводили еженедельно, независимо от количества и вида выявленных особей тлей. Это было необходимо, поскольку опасность представляет не повреждение, которое наносят тли, а передаваемая ими вирусная инфекция. Даже пробные уколы единичных особей неспециализированных видов тлей могут привести к инфицированию растений картофеля вирусами. При выращивании миниклубней заражение растений вирусами недопустимо [1, 18, 25, 26]. Показателем эффективности действия изученного водного раствора имидаклоприда явился проведенный лабораторией Россельхозцентра по Ленинградской обл. иммуноферментный анализ на наличие скрытой вирусной инфекции как в фазе цветения (листья), так и в миниклубнях после уборки. В опытных растениях и полученных клубнях не было обнаружено латентной вирусной инфекции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные результаты исследования позволили сделать вывод об эффективности применения имидаклоприда в различных технологиях защиты семенного картофеля от тлей – переносчиков вирусов в открытом грунте и теплицах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шпаар Д., Быкин А., Дрегер Д., Захаренко А., Иванюк В., Каленская С., Кюрцингер В.* Картофель. Выращивание, уборка и хранение. Научн.-практ. руко-во. М.: Агродело, 2007. 457 с.
2. *Toor R., Teulon D.* Potato aphid virus project – Final report 2002–2005 – Towards an insecticide resistance management strategy to control aphid virus vectors in potatoes // New Zealand Institute for Crop and Food Research, October, 2005.
3. *Амелюшкина Т.А., Семешкина П.С.* Комплекс агроприемов при выращивании семенного картофеля (метод. рекоменд.). Калуга, 2010. С. 25–31.
4. *Анисимов Б.В., Белов Г.Л., Варицев Ю.А., Еланский С.Н., Журомский Г.К., Завриев С.К., Зейрук В.Н.* Защита картофеля от болезней, вредителей и сорняков. М.: Картофелевод, 2009. 272 с.
5. *Берим М.Н.* Тли – вредители картофеля // Защита картофеля. 2017. № 1. С. 30–34.
6. *Зейрук В.Н., Белякова Н.А., Белов Г.Л., Васильева С.В., Деревягина М.К.* Биологический метод защиты меристемного картофеля в закрытом грунте // Защита картофеля. 2018. № 2. С. 3–8.
7. *Попова Л.А., Шаманин А.А., Корелина В.А., Берим М.Н.* Динамика численности тлей-переносчиков вирусов на семенных посадках картофеля в Архангельской области // Вестн. Курск. ГСХА. 2018. № 9. С. 69–76.
8. *Шелабина Т.А., Берим М.Н.* Мониторинг динамики численности тлей – потенциальных переносчиков вирусов на посадках картофеля на Северо-Западе России // Изв. Оренбург. ГАУ. 2018. № 5 (73). С. 111–114.

9. *Pelletier Y., Nie X., Giguere M.-F.* A New approach for the identification of *Aphid Vectors* (Hemiptera, Aphididae) of potato Virus Y // J. Econ. Entomol. 2012. V. 105. Iss. 6. P. 1909–1914.
10. *Долженко В.И., Голубев А.С., Долженко О.В., Герасимова А.В.* Ассортимент пестицидов для защиты картофеля // Картофель и овощи. 2014. № 2. С. 22–24.
11. *Сухорученко Г.И., Иванова Г.П., Волгарев С.А., Вилкова Н.А., Фасулати С.Р., Верещагина А.Б., Берим М.Н.* Система интегрированной защиты репродукционного семенного картофеля от комплекса вредных организмов в Северо-Западном регионе Российской Федерации. СПб., 2016. 137 с.
12. *Волгарев С.А., Иванова Г.П., Сухорученко Г.И., Берим М.Н.* Проблемы мониторинга тлей – переносчиков вирусной инфекции при выращивании меристемного картофеля на примере Ленинградской области // Вестн. защиты раст. 2018. № 4 (98). С. 34–40.
13. *Фоминых Т.С., Медведева К.Д.* Вирусные болезни картофеля на Северо-Западе России // Вестн. защиты раст. 2018. № 4 (98). С. 40–44.
14. *Mowry T., Ophus J.* Effects of sub-lethal imidacloprid levels on potato leafroll virus transmission by *Myzus persicae* // Entomol. Exp. Applicata. 2002. V. 103. P. 249–255.
15. *Анисимов Б.В., Зебрин С.Н., Логинов С.И.* На мировом уровне // Картофель и овощи. 2016. № 7. С. 20–21.
16. Pest free potato (*Solanum* spp.) micropropagative material and minitubers for international trade (2010) // International Standards for Phitosanitary Measures. ISPM, FAO, 2011. 20 p.
17. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33996-2016 Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества. М.: Стандартинформ, 2016. 41 с.
18. *Анисимов Б.В., Симаков Е.А., Жевора С.В., Овэс Е.В., Зебрин С.Н., Митюшкин А.В., Журавлев А.А., Блинков Е.Г., Юрлова С.М., Усков А.И., Зейрук В.Н., Федотова Л.С.* Современные технологии производства семенного картофеля. Практ. рук-во. Чебоксары, 2018. 48 с.
19. Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 280 с.
20. The Pesticide Manual. BCPC, 2012. 561 p.
21. *Илларионов А.И.* Экотоксикология пестицидов. Воронеж: ВГАУ, 2016. 262 с.
22. *Zang Y., Zhong Y., Luo Y.* Genotoxicity of two novel pesticides for the earthworm // Environ. Pollut. 2000, V. 6. P. 271–278.
23. *Cox L.* Imidacloprid // J. Pest. Reform. 2001. V. 21. № 1. P. 15–21.
24. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных для применения на территории Российской Федерации. М., 2019. 848 с.
25. *Сухорученко Г.И., Долженко В.И., Новожилов К.В.* Методы оценки действия инсектицидов на членистоногих // Вестн. защиты раст. 2006. № 3. С. 3–12.
26. Технологический процесс производства оригинального, элитного и репродукционного семенного картофеля. Практ. рук-во / Под ред. Малько А.М., Анисимова Б.В. М.: *Россельхозцентр, ВНИИКХ*, 2017. 64 с.

Imidacloprid and Technologies of Its Application for Potato Seed Plantings Protection against Aphids

O. V. Dolzhenko[a] and T. V. Dolzhenko[b,#]

[a] *All-Russia Institute for Plant Protection*
Podbelsky shosse 3, St.Petersburg–Pushkin 196608, Russia

[b] *Sankt-Petersburg State Agrarian University*
Peterburgskoe shosse 2, St.Petersburg–Pushkin 196601, Russia

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

Research data on biological effectiveness of imidacloprid, a neonicotinoid insecticide formulated as suspension concentrate (SC) (200 or 600 g a.i./l), as soluble concentrate (SC) (200 g a.i./l), as water dispersible granules (WDG) (700 g a.i./kg) and as active soluble (AS) (0.1 g a.i./l) for seed potato protection against aphids, virus vectors are presented. The following application technologies of the insecticide are used: pre-planting treatment of tubers, treatment of the furrow bottom simultaneously with tubers planting, plant spraying. The conclusion on imidacloprid high biological effectiveness (up to 100%) and potential of effective use of different technologies of its application against aphids in both glasshouse and field seed potato is made.

Key words: potato, viruses, biological effectiveness, aphids, virus vectors, insecticide imidacloprid.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 71–77

Агроэкология

УДК 631.87:631.872:633.11«324»(470.323)

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ В КАЧЕСТВЕ ДЕСТРУКТОРОВ СОЛОМЫ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2021 г. В. И. Лазарев[1,*], Ж. Н. Минченко[1], А. А. Русакова[1]

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

*****E-mail: vla190353@yandex.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.
После доработки 16.03.2020 г.
Принята к публикации 13.10.2020 г.

Изучено влияние препаратов микобакт, гумистим и трихофит на микробиологическую активность чернозема типичного, разложение соломы озимой пшеницы и урожайность следующей культуры севооборота – сахарной свеклы. Установлено, что обработка измельченной соломы после уборки озимой пшеницы препаратом гумистим в дозе 5 л/га за 90 сут экспозиции повышала микробиологическую активность почвы (убыль льняной ткани) до 62.9%, при убыли льняной ткани в контрольном варианте 46.9%. Использование микробиологических препаратов трихофит в дозе 7 л/га и микобакт в дозе 3 л/га в качестве деструкторов способствовало увеличению степени разложения льняных полотен до 68.1 и 75.3% соответственно. Обработка соломы микробиологическими препаратами гумистим 5 л/га, трихофит 7 л/га, микобакт 3 л/га, а также двукратная обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках и фазе смыкания листьев в междурядьях этими препаратами способствовала повышению урожайности сахарной свеклы на 3.5–4.3 т/га, увеличивала стоимость валовой продукции на 3500–4300 руб./га. Учитывая невысокую стоимость самих удобрений и малые нормы их внесения, это было экономически выгодно. Величина условно чистого дохода от применения микробиологических препаратов составила 2040–2950 руб/га. Наиболее экономически выгодным было использование микробиологического препарата микобакт.

Ключевые слова: микробиологические препараты микобакт, трихофит, гумистим, солома, биологическая активность, деструкция, сахарная свекла, урожайность, экономическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188121020083

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных составляющих эффективного ведения земледелия является создание бездефицитного баланса органического вещества в почве, который может быть обеспечен как внесением органических удобрений, так и за счет использования пожнивных растительных остатков культур-предшественников и т.п. [1, 2]. Использование последних является наиболее доступным и экономически выгодным, поскольку позволяет с биомассой растений частично вернуть в почву вынесенные элементы минерального питания [3, 4].

Однако послеуборочные растительные остатки зерновых культур разлагаются довольно медленно из-за высокого содержания в них лигнина, целлюлозы и низкого содержания азота. Процессы деструкции соломы затягиваются на 3–5 лет, что приводит к снижению содержания минерального азота, поступающего в почву с соломой [5, 6].

Одним из способов ускорения разложения и повышения коэффициента гумификации стерни и соломы является обработка их биологическими препаратами-деструкторами [7, 8]. В настоящее время существует много биопрепаратов-деструкторов, эффективно разлагающих пожнивные остатки. Эти препараты способны повышать плодородие почвы за счет обогащения ее полезной микрофлорой, улучшать минеральное питание растений, подавлять развитие патогенов, увеличивать продуктивность сельскохозяйственных культур [9]. Однако по большей части препараты-деструкторы применяют в сельскохозяйственном производстве без достаточного научного обоснования.

В связи с этим цель работы – изучение эффективности воздействия микробиологических препаратов микобакт, трихофит и гумистим на интенсивность разложения соломы озимой пшеницы и их влияния на урожайность следующей культуры севооборота – сахарной свеклы в условиях черноземных почв Курской обл.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в полевых опытах Курского федерального аграрного научного центра в 2016–2019 гг., в севообороте со следующим чередованием культур: чистый пар–озимая пшеница–сахарная свекла–ячмень. В качестве объектов исследования использовали микробиологические препараты микобакт, трихофит, гумистим.

Микобакт – это микробиологическое удобрение, производимое на основе бактерий *Micrococcus luteus* штамм ПБТ-1 и микроскопических грибов *Penicillium* sp. штамм ПБТ-2. Представляет собой жидкость, содержащую биомассу этих микроорганизмов и их метаболиты, образующиеся при культивировании, а также остатки питательной среды. Удобрение рекомендуется для ускорения разложения (гумификации) органических остатков природного происхождения. Микобакт позволяет блокировать развитие патогенных микроорганизмов в начальный период вегетации растений, что обеспечивает их нормальное физиологическое развитие.

Трихофит (водная суспензия бактерии *Trichoderma viride*) – инсектофунгицидный препарат на основе гриба рода триходерма. В результате действия продуцируемых ферментов хитиназы и глюконазы трихофит является биодеструктором соломы и целлюлозных отходов, способствует разложению полисахаридов и переводу веществ в доступные формы для растений.

Гумистим – это комплексное экологически безопасное удобрение, производимое из биогумуса, торфа и настоев лекарственных растений. Препарат содержит все компоненты вермикомпоста в растворенном состоянии: гумины, фульвокислоты, витамины, природные фитогормоны, микро- и макроэлементы в легкоусвояемой растениями форме и споры полезных почвенных микроорганизмов. Гумистим является индуктором иммунитета растений, обладает адаптогенными свойствами, способствует антистрессовой устойчивости растений к заболеваниям и неблагоприятным условиям среды.

Почва опытного участка – чернозем типичный мощный тяжелосуглинистого гранулометрического состава. Содержание гумуса в пахотном слое составляло 6.1%, подвижного фосфора (по Чирикову) – 15.6, обменного калия (по Масловой) – 11.3 мг/100 г почвы. Реакция почвенной среды нейтральная (pH 6.5–7.0).

Повторность в опытах трехкратная. Делянки имели форму вытянутого прямоугольника с учетной площадью 100 м^2. Схема опыта включала следующие варианты: 1 – контроль, без обработки соломы и посевов сахарной свеклы микробиологическими препаратами, 2 – обработка соломы (гумистим 5 л/га) + обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках (гумистим 5 л/га) + обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в междурядьях (гумистим 5 л/га), 3 – обработка соломы (микобакт 3 л/га) + обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках (микобакт 3 л/га) + + обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в междурядьях (микобакт 3 л/га), 4 – обработка соломы (трихофит 7 л/га) + обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках (трихофит 3 л/га) + обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в междурядьях (трихофит 3 л/га).

Измельченную солому и стерню озимой пшеницы в дозе 5.0–5.5 т/га (количество послеуборочных остатков, оставленное в поле после уборки урожая) обрабатывали микробиологическими препаратами ранцевым опрыскивателем через 3–5 сут после уборки и сразу же заделывали в почву дисковой бороной БДТ-3 на глубину 8–10 см. Основную обработку почвы (вспашку) проводили в 1-й декаде октября на глубину 28–30 см.

Микробиологическую активность почвы определяли методом аппликаций, путем закладки льняных полотен в почву на глубину 15–20 см. Разложение льняных полотен наблюдали через 90 сут после их закладки.

Влияние соломы озимой пшеницы, обработанной микробиологическими препаратами, на урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы определяли в 2017–2019 гг. Технология возделывания сахарной свеклы соответствовала рекомендованной в ЦЧР. Доза внесения минеральных удобрений – N90P90K90 под основную обработку почвы.

В опыте проводили определения следующих показателей: влажность почвы – термостатно-весовым методом по Роде, содержание нитратного азота – колориметрически-дисульфофеноловым методом по Грандваль–Ляжу. Уборку и учет урожая сахарной свеклы проводили путем выпахивания ее свеклоподъемником, корнеплоды очища-

Таблица 1. Влияние микробиологических препаратов на степень разложения льняных полотен (2016–2018 гг.)

Вариант	Через 90 сут			
	масса ткани до закладки	масса ткани после закладки	масса разложившейся ткани	степень разложения, %
	г			
1. Контроль	2.3	1.2	1.1	46.9
2. Обработка соломы, гумистим 5 л/га	2.2	0.8	1.4	62.9
3. Обработка соломы, микобакт 3 л/га	2.1	0.5	1.6	75.3
4. Обработка соломы, трихофит 7 л/га	2.4	0.8	1.6	68.1
$НСР_{05}$		1.6		

Таблица 2. Влияние микробиологических препаратов на степень разложения соломы озимой пшеницы (2016–2018 гг.)

Вариант	Масса неразложившейся соломы, г	Масса отмытых из почвы остатков, г	Отмываемые остатки в почве до внесения соломы, г	Масса разложившейся соломы, г	Степень разложения относительно исходного количества, %
1. Контроль	23.6	9.0	2.2	6.8	20.8
2. Обработка соломы, гумистим 5 л/га	20.3	14.8		12.6	35.9
3. Обработка соломы, микобакт (3 л/га)	20.8	10.1		12.3	39.9
4. Обработка соломы, трихофит (7 л/га)	22.3	9.9		12.2	37.8
$НСР_{05}$			1.3		

ли от ботвы и почвы вручную и взвешивали в поле на передвижных десятичных весах. Статистическую обработку результатов проводили методом дисперсионного анализа с помощью пакета Microsoft Excel [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения за микробиологической активностью почвы (метод аппликаций) показали, что за 90 сут экспозиции (август–октябрь) в контрольном варианте льняные полотна разложились на 46.9% (табл. 1).

Обработка измельченной соломы микробиологическим препаратом гумистим в дозе 5 л/га повышала убыль льняной ткани до 62.9% относительно исходного веса. В варианте с использованием препарата трихофит 7 л/га степень разложения льняного полотна увеличивалась до 68.1%, препарата микобакт 3 л/га – до 75.3% (рис. 1). Более высокая микробиологическая активность почвы оказывала существенное влияние на разложение соломы озимой пшеницы. Результаты лабораторного опыта показали, что степень разложения соломы через 60 сут экспозиции в контрольном варианте составила только 20.8%. В варианте с обработкой соломы препаратом гумистим 5 л/га степень ее разложения повышалась до 35.9%. Использование в качестве деструктора соломы микробиологического препарата трихофит 7 л/га приводила к увеличению степени разложения пшеничной соломы на 17.0% (37.8%), препарата микобакт 3 л/га – на 19.1% в сравнении с контролем, что составило 39.9% (табл. 2).

Степень разложения пшеничной соломы оказывала влияние на влагообеспеченность посевов и азотный режим почвы под посевом сахарной свеклы. Например, в варианте с обработкой соломы препаратом гумистим 5 л/га запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы составили 33.2 мм при запасах влаги в почве контрольного варианта, равных 31.7 мм (табл. 3). В вариантах с обработкой соломы озимой пшеницы микробиологическими препаратами трихофит (7 л/га) и микобакт (3 л/га) запасы продуктивной влаги в

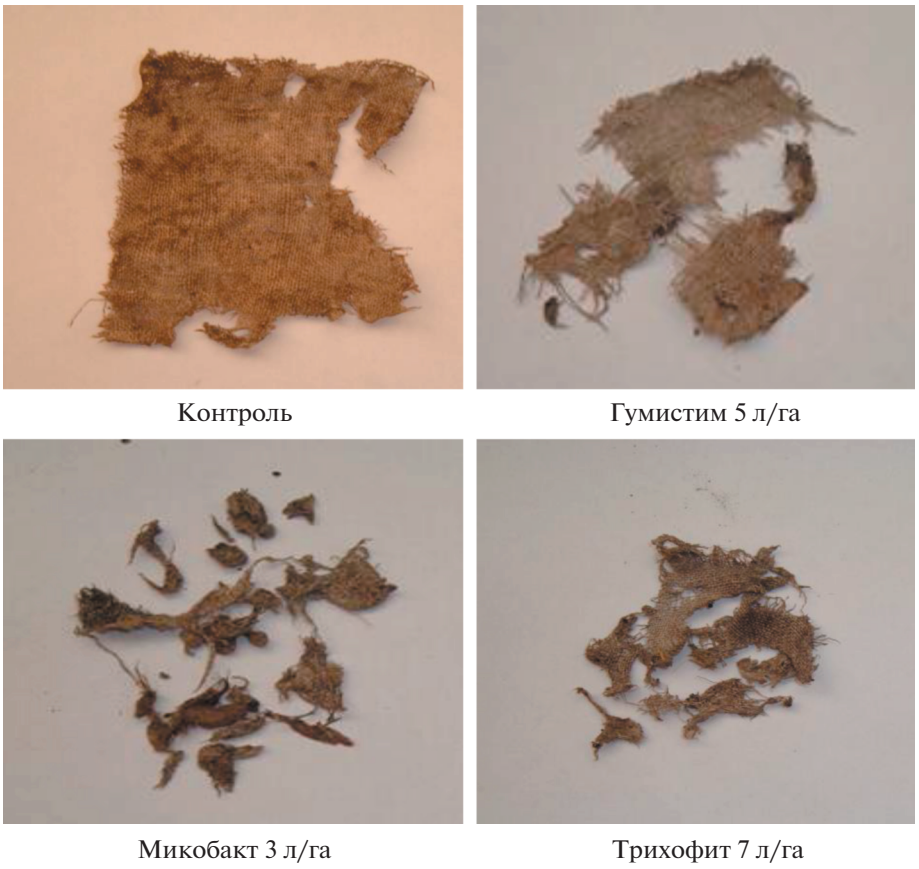

Рис. 1. Степень разложения льняных полотен под влиянием микробиологических препаратов за 90 сут.

пахотном слое почвы составили 33.5–33.9 мм, или на 1.8–2.2 мм больше, чем в контрольном варианте.

Содержание нитратного азота в слое 0–40 см почвы перед посевом сахарной свеклы в вариантах с обработкой соломы микробиологическими препаратами гумистим, микобакт и трихофит составило 3.06–3.19 мг/100 г почвы или на 0.52–0.65 мг/100 г больше, чем в контроле (табл. 4).

Таблица 3. Влияние обработки соломы озимой пшеницы микробиологическими препаратами на запасы доступной влаги в почве перед посевом сахарной свеклы (2017–2019 гг.), мм

Система удобрения	Слой почвы		
	0–25 см	0–40 см	0–100 см
1. Контроль	31.7	51.6	126
2. Обработка соломы, гумистим 5 л/га	33.2	52.1	127
3. Обработка соломы, микобакт 3 л/га	33.9	52.4	129
4. Обработка соломы, трихофит 7 л/га	33.5	52.2	128
$НСР_{05}$	1.1	1.4	2

Лучший водный и азотный режимы в вариантах с более высокой степенью разложения соломы положительно сказывались на урожайности сахарной свеклы. Например, в варианте с обработкой соломы препаратом гумистим 5 л/га и двукратной обработкой посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках (гумистим 5 л/га) и фазе смыкания листьев в междурядьях (гумистим 5 л/га) урожайность сахарной свеклы повышалась на 3.5 т/га или на 6.8% в сравнении с контролем (табл. 5).

Обработка соломы озимой пшеницы препаратом трихофит 7 л/га и посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках (трихофит 3 л/га) и фазе смыкания листьев в междурядьях (трихофит 3 л/га) повышала урожайность корнеплодов на 3.6 т/га или 6.9%.

Использование в качестве деструктора соломы микробиологического препарата микобакт 3 л/га и обработке посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках (микобакт 3 л/га) и фазе смыкания листьев в междурядьях (микобакт 3 л/га)

Таблица 4. Влияние обработки соломы озимой пшеницы микробиологическими препаратами на содержание нитратного азота в слое 0–40 см почвы

Вариант	$N\text{-}NO_3$, мг/100 г почвы		
	перед посевом	период смыкания рядков	перед уборкой
1. Контроль	2.54	2.66	0.30
2. Гумистим 5 л/га (обработка соломы) + гумистим 5 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в рядках) + гумистим 5 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	3.06	3.17	0.41
3. Микобакт 3 л/га (обработка соломы) + микобакт 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в рядках) + микобакт 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	3.19	3.37	0.43
4. Трихофит 7 л/га (обработка соломы) + трихофит 3 л/га (обработка в фазе смыкания листьев в рядках) + трихофит 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	3.16	3.33	0.42
$НСР_{05}$	0.45	0.51	0.72

Таблица 5. Влияние микробиологических препаратов на урожайность сахарной свеклы, содержание и выход сахара с 1 га посева (2017–2019 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Соотношение корни : ботва	Содержание сахара, %	Выход сахара	
				ц/га	% к контролю
1. Контроль	51.6	1 : 0.66	18.3	94.4	100
2. Гумистим 5 л/га (обработка соломы) + + гумистим 5 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в рядках) + гумистим 5 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	55.1	1 : 0.87	20.9	115	122
3. Микобакт 3 л/га (обработка соломы) + + микобакт 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в рядках) + микобакт 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	55.9	1 : 0.94	21.2	119	126
4. Трихофит 7 л/га (обработка соломы) + + трихофит 3 л/га (обработка в фазе смыкания листьев в рядках) + трихофит 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	55.2	1 : 0.85	21.1	117	123
$НСР_{05}$, ц/га	0.9		0.5		

обеспечивало максимальную прибавку урожая – 4.3 т/га или 8.3%.

Установлено, что обработка пшеничной соломы микробиологическими препаратами и двукратная обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках и фазе смыкания листьев в междурядьях способствовала повышению содержания сахара в корнеплодах на 2.6–2.9%.

Использование микробиологических препаратов в качестве деструкторов пшеничной соломы и обработки посевов сахарной свеклы было экономически выгодно (табл. 6). При расчете экономической эффективности использования микробиологических препаратов за основу были приняты следующие показатели: стоимость препарата микобакт – 150, гумистим – 120, трихофит – 120 руб./л, урожайность сахарной свеклы в контрольном варианте и в вариантах опыта – фактически полученная в опыте, стоимость корнеплодов сахарной свеклы – сложившаяся в 2019 г.

Таблица 6. Экономическая эффективность микробиологических препаратов при возделывании сахарной свеклы (2017–2019 гг.)

Вариант	Стоимость препарата, руб./кг, л	Норма внесения, л/га	Затраты на 1 га, руб.	Урожайность, т/га	Прибавка урожая от применения препарата, т/га	Стоимость прибавки, руб./га	Условно чистый доход, руб./га
1. Контроль	–	–	–	51.6	–	–	–
2. Гумистим 5 л/га (обработка соломы) + гумистим 5 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в рядках) + гумистим 5 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	120	1320	1320	55.1	3.5	3500	2180
3. Микобакт 3 л/га (обработка соломы) + микобакт 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в рядках) + микобакт 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	150	1350	1350	55.9	4.3	4300	2950
4. Трихофит 7 л/га (обработка соломы) + трихофит 3 л/га (обработка в фазе смыкания листьев в рядках) + трихофит 3 л/га (обработка посевов в фазе смыкания листьев в междурядьях)	120	1560	1560	55.2	3.6	3600	2040

(1 тыс. руб./т). Расчеты показали, что обработка соломы микробиологическими препаратами микобакт (3 л/га), гумистим (5 л/га), трихофит (7 л/га) и двукратная обработка посевов этими препаратами в фазе смыкания листьев в рядках и смыкании листьев в междурядьях повышала урожайность сахарной свеклы на 3.5–4.3 т/га и способствовала получению 2180–2950 руб. условно чистого дохода/га за минусом затрат, связанных с собственно внесением препаратов. Наиболее экономически выгодным было использование микробиологического препарата микобакт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлена высокая эффективность микробиологических препаратов микобакт, гумистим и трихофит в повышении микробиологической активности почвы и разложении пшеничной соломы. Использование препарата гумистим 5 л/га повышало убыль льняной ткани до 62.9% относительно исходного веса. Обработка соломы микробиологическим препаратом трихофит 7 л/га повышала степень разложения льняного полотна до 68.1%, препаратом Микобакт 3 л/га – до 75.3%. Обработка соломы микробиологическими препаратами гумистим, трихофит, микобакт, а также двукратная обработка посевов сахарной свеклы в фазе смыкания листьев в рядках и фазе смыкания листьев в междурядьях этими препаратами повышала урожайность сахарной свеклы на 3.5–4.3 т/га при урожайности в контрольном варианте, равной 51.6 т/га, и увеличивало стоимость валовой продукции на 3500–4300 руб./га. Учитывая невысокую стоимость самих удобрений и малые нормы их внесения, это было экономически выгодно. Величина условно чистого дохода от использования микробиологических препаратов составила 2040–2950 руб./га. Наиболее экономически выгодным было использование микробиологического препарата микобакт.

В связи с этим для повышения биогенности почвы и ускорения степени разложения соломы, перед заделкой ее в почву следует широко использовать микробиологические препараты микобакт 3 л/га, трихофит 7 л/га и гумистим 5 л/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лопырев М.И., Постолов В.Д., Дедов А.В.* Каталог проектов агроландшафтов в земледелии (сохранение плодородия, территориальная организация систем земледелия, устойчивость к изменению климата / Под ред. Лопырева М.И. Воронеж: Полиарт, 2010. 164 с.
2. *Семыкин В.А., Картамышев Н.И., Мальцев В.Ф., Дедов А.В.* Биологизация земледелия в основных земледельческих регионах России / Под ред. Картамышева Н.И. М.: КолосС, 2012. 471 с.
3. *Кирюшин В.И.* Агрономическое почвоведение. М.: КолосС, 2010. 131 с.

4. *Дедов А.В., Несмеянова М.А., Хрюкин Н.Н.* Приемы биологизации и воспроизводство плодородия черноземов // Земледелие. 2012. № 6. С. 4–6.
5. *Емцев В.Т., Мишустин Е.Н.* Микробиология. М.: Дрофа, 2005. 444 с.
6. *Харченко А.Г.* Новый ключ к восстановлению плодородия почвы [Электр. ресурс] // Зерно. 2012. № 9. Режим доступа: http://www.zernoua.com/p=14127
7. *Шевченко В.Е., Федотов В.Н.* Биологизация и адаптивная интенсификация земледелия в Центральном Черноземье. Воронеж, 2000. С. 91–96.
8. *Лазарев В.И., Казначеев М.Н., Айдиев А.Ю., Стифеев А.И., Сонин В.А.* Эффективность биопрепаратов на посевах сельскохозяйственных культур. Курск, 2003. 127 с.
9. *Петров В.Б., Чеботарь В.К.* Микробиологические препараты в практическом растениеводстве России: функции, эффективность, перспективы // Главный агроном. 2011. № 5. С. 16–19.
10. *Доспехов Б.А.* Методика опытного дела. М.: Колос, 1985. 351 с.

Agroecological Justification of the Use of Microbiological Preparations as Destructors of Winter Wheat Straw in the Conditions of Black Earth Soils of the Kursk Region

V. I. Lazarev[a,#], Zh. N. Minchenko[a], and A. A. Rusakova[a]

[a] *Kursk Federal Agricultural Research Center*
ul. Karla Marksa 70b, Kursk 305021, Russia
[#] *E-mail: vla190353@yandex.ru*

The influence of Humistim and Trichophyte preparations on the microbiological activity of typical Chernozem. decomposition of winter millet straw. and yield of the next crop rotation crop-sugar beet was studied. It was found that soil treatment with Humistim at a dose of 5 l/ha for 90 days of exposure increased the microbiological activity of the soil (loss of linen tissue) by 16.0% compared with the control of 46.9%. The use of microbiological preparations Trichophyte at a dose of 7 l/ha and Mycobact at a dose of 3 l/ha as destructors contributed to an increase in the decomposition rate of linen cloths to 68.1 and 75.3% respectively. Treatment of straw with microbiological preparations of Gumistim at a dose of 5 l/ha, Tricovit at a dose of 7 l/ha, Micobalt in a dose 3 l/ha and two treatments of sugar beet in the phase closing leaves in the rows and the phase of closing leaves between rows (of Humeston 5 l/ha). Tricovit (7 l/ha), Mycobact (3 l/ha) increased sugar beet yield by 3.5–4.3 t/ha with a yield in the control variant is equal to 51.6 t/ha. increased the value of gross output at 3500–4300 rubles /ha and given the low cost of the fertilizer and small rules of their application economically viable. The value of the conditional net income from the use of microbiological preparations was 2040–2950 rubles/ha, the most cost-effective was the use of the microbiological preparation Mycobact.

Key words: microbiological preparations mycobact, trichophyte, humistim, straw, biological activity, destruction, sugar beet, yield, economic efficiency.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 78–85

Экотоксикология

УДК 633.16:581.4:546.815:581.5

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СОРТОВ ЯЧМЕНЯ ПО УСТОЙЧИВОСТИ К КАДМИЮ СОХРАНЯЕТСЯ НА ПРОТЯЖЕНИИ ВСЕГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАСТЕНИЙ

© 2021 г. С. А. Гераськин[1,*], А. В. Дикарев[1], М. А. Лыченкова[1]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 109 км, Россия
**E-mail: stgeraskin@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.07.2020 г.
После доработки 18.08.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

В вегетационном эксперименте исследовали концентрации кадмия в растениях, биохимические, морфологические и продуктивные показатели четырех контрастных по устойчивости к кадмию сортов ярового ячменя для ответа на вопрос: будут ли отобранные на основе исследования проростков сорта демонстрировать аналогичные реакции на действие кадмия на протяжении всего жизненного цикла. Обнаружены существенные различия уровней накопления кадмия в тканях растений. Установлено, что концентрация кадмия 50 мг/кг дерново-подзолистой почвы является критической для ячменя и позволяет уверенно разделить контрастные по устойчивости к этому тяжелому металлу сорта. Различия между устойчивыми и чувствительными сортами проявлялись на организменном уровне (площадь листьев, высота растений, структура урожая). По биохимическим параметрам различий между контрастными сортами обнаружено не было.

Ключевые слова: ячмень, кадмий, площадь листьев, высота растений, структура урожая, пролин, малоновый диальдегид.

DOI: 10.31857/S0002188121020071

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке загрязнение агросферы токсикантами техногенного происхождения стало одним из факторов, сдерживающих развитие сельского хозяйства и создающих угрозу для здоровья населения. Одним из главных компонентов промышленных выбросов, представляющих опасность для живых организмов, являются тяжелые металлы (**ТМ**), в том числе кадмий, который поступает в природные и аграрные экосистемы в результате работы горной и топливной промышленности, эксплуатации аккумуляторов и других источников питания, производства лаков, красок и др.

Растения являются основным компонентом, определяющим продуктивность агроэкосистем, поэтому изучение их устойчивости к действию техногенных факторов имеет как теоретическую, так и практическую значимость. В качестве наиболее общих проявлений стресса, обусловленного избыточным содержанием ТМ, выделяют повреждение мембран, изменение активности ферментов, ингибирование роста растений [1]. В тканях растений усиливается образование активных форм кислорода, что, в частности, интенсифицирует процессы перекисного окисления липидов мембран, ведет к изменению структурно-функционального состояния клеток. Загрязнение почв ТМ негативно влияет на рост и урожайность сельскохозяйственных культур, ведет к накоплению тяжелых металлов в продукции растениеводства. Накопление ТМ в съедобных частях растений является основным путем их поступления в пищевую цепь человека [2]. Особого внимания в этой связи заслуживает кадмий, поскольку относится к металлам, чьи ионы легко поступают в растения [3]. Интегральным показателем, определяющим устойчивость сельскохозяйственных растений к техногенному воздействию, является продуктивность, снижение которой свидетельствует о нарушении важнейших функций растений. В условиях стресса продуктивность растений снижается, поэтому знание механизмов их устойчивости к внешним воздействиям позволяет сохранить объемы сельскохозяйственного производства в условиях техногенеза.

Механизмы поступления и биологического действия тяжелых металлов в целом сходны для

Таблица 1. Агрохимические характеристики использованной в эксперименте почвы

Показатель	Дерново-подзолистая супесчаная
pH_{KCl}	5.22 ± 0.01
Гумус, %	1.01 ± 0.02
$H_г$, мг-экв/100 г почвы	1.89 ± 0.02
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	5.3 ± 0.01
Обменный K_2O, мг/кг почвы (по Масловой)	77.7 ± 1.3
Подвижный P_2O_5, мг/кг почвы (по Кирсанову)	127 ± 2

всех живых существ. Принято считать [4], что в большинстве растений кадмий не вовлечен в физиологические процессы (лишь у морских диатомей обнаружена Cd-карбониловая ангидраза). В то же время он является крайне токсичным элементом, что обусловлено его способностью индуцировать оксидативный стресс, связываться с SH-группами биополимеров и способностью замещать цинк в ферментах [5]. Однако при анализе действия ТМ на сельскохозяйственные культуры необходимо учитывать не только характеристики самого растения и металла, но и почвы, на которых оно произрастает. Физико-химические свойства, гранулометрический состав, плодородие, тип почвы способны существенно модифицировать ответ растения на действие поллютанта [5].

В наших предыдущих лабораторных экспериментах [6] были установлены концентрации кадмия, вызывающие существенное подавление развития проростков ячменя, исследован внутривидовой полиморфизм 50-ти сортов ячменя разного географического происхождения и выявлены сорта, контрастные по устойчивости к кадмию, установлены аллельные варианты изоферментов, связанные с устойчивостью или чувствительностью к кадмию. В связи с этим возник вопрос: будут ли отобранные на основе исследования проростков сорта демонстрировать аналогичные реакции на действие кадмия на протяжении всего жизненного цикла растений? С целью ответа на этот вопрос в рамках вегетационного опыта были исследованы морфометрические, биохимические показатели и продуктивность 4-х выявленных в наших экспериментах на проростках контрастных по устойчивости к кадмию сортов ячменя в условиях загрязнения почвы кадмием.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент по изучению реакции контрастных сортов ярового двурядного ячменя на загрязнение почвы кадмием был заложен на дерново-подзолистой супесчаной почве. Агрохимические характеристики почвы представлены в табл. 1.

Кадмий вносили в виде нитрата $Cd(NO_3)_2$ в концентрациях 25 и 50 мг/кг почвы. При выборе концентрации руководствовались данными, полученными в проведенных ранее вегетационных опытах по изучению ответных реакций растений ячменя на действие широкого диапазона концентраций кадмия [5]. На основе анализа данных о реакции морфометрических и биохимических показателей растений ячменя была выбрана критическая доза, которая вызывает существенное угнетение рассматриваемых параметров, но еще позволяет растению нормально развиваться и завершить свой жизненный цикл.

Для исследования были выбраны контрастные по устойчивости к кадмию сорта ярового ячменя из мировой коллекции ВИР: устойчивые – Симфония (Украина) и Местный (Удмуртия), чувствительные – Са 220702 (Дания) и Malva (Латвия). Методика оценки чувствительности и процедура выбора этих сортов были описаны в работах [6, 7]. Растения выращивали в пластиковых сосудах емкостью 5 кг по общепринятой методике [8]. В контроле и варианте 50 мг Cd/кг опыт проводили в 4-кратной повторности для каждого сорта, 25 мг Cd/кг – в 3-кратной повторности, всего 44 сосуда. При закладке опыта почву тщательно перемешивали и вносили в нее питательные элементы в виде водных растворов солей NH_4NO_3, и K_2HPO_4 из расчета $N_{200}P_{25}K_{33}$. При внесении в почву питательных веществ учитывали и корректировали количество азота, поступавшее с раствором соли кадмия. Контролем служил вариант с NPK без внесения кадмия. При выборе солей питательных элементов и их концентраций руководствовались рекомендациями [8, 9]. Перед посевом почву инкубировали в течение 14 сут при температуре 20–23°C и влажности 60% ПВ. Растения выращивали до товарной спелости в условиях постоянной влажности почвы (60% ПВ). Положение вегетационных сосудов меняли ежедневно по схеме, обеспечивающей однородные условия роста и развития растений. Растения поливали дистиллированной водой.

Минерализацию растительных проб и кислотную экстракцию из них кадмия выполняли в соответствии с указаниями [10]. Содержание кадмия определяли на ИСП-ОЭС Liberty AX (США). Отбор проб растений для биометрического и био-

Таблица 2. Содержание кадмия в растениях ячменя, мг/кг

Устойчивость	Сорт	Солома			Зерно		
		Варианты (Cd^{2+} в почве, мг/кг)					
		0	25	50	0	25	50
Устойчивые	Симфония	0.26 ± 0.56	51.00 ± 5.52	105.52 ± 2.67	0.27 ± 0.58	3.10 ± 1.91	10.80 ± 3.43
	Местный	0.51 ± 0.79	55.35 ± 5.49	124.65 ± 6.12	0.11 ± 0.37	6.12 ± 2.65	9.91 ± 3.30
Чувствительные	Malva	0.32 ± 0.64	38.04 ± 5.50	217.80 ± 18.14	0.19 ± 0.49	38.04 ± 5.50	–
	Ca 220702	0.58 ± 0.84	56.44 ± 5.51	205.28 ± 16.33	0.12 ± 0.38	49.41 ± 5.56	–

химического анализов проводили через 30 сут после всходов. Содержание свободного пролина и малонового диальдегида (**МДА**) определяли в пробах листьев согласно методикам, описанным в работах [11] и [12] соответственно. До урожая оставляли по 10 растений на сосуд. В течение всего вегетационного периода вели фенологические наблюдения. При уборке урожая через 90 сут после всходов определяли структуру урожая по следующим показателям: высота растений, общее число стеблей и число продуктивных стеблей, масса колосьев, масса соломы, общее число колосьев и число колосьев с зерном, масса зерна, число зерен в колосе.

Для статистического анализа экспериментальных данных использовали программные пакеты MS Excel 2003 и Statistica 10.0. Статистическую значимость различий оценивали с помощью *U*-критерия Манна–Уитни. На графиках и диаграммах приведены среднеарифметические величины в расчете на одно растение и доверительные интервалы показателей (в % к контролю) при 95%-ном уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание кадмия в тканях растений. Дерново-подзолистые почвы отличаются низким естественным содержанием ТМ. В то же время подвижность металлов в песчаных почвах относительно суглинистых разновидностей повышена [13], что увеличивает риски проявления фитотоксических эффектов и снижения урожайности при выращивании сельскохозяйственных растений на техногенно-загрязненных почвах. В контроле содержание кадмия в зерне и соломе контрастных сортов не различалось (табл. 2). Одним из возможных механизмов, повышающих устойчивость растений к загрязнению почвы ТМ, является снижение их поступления в растение. Действительно, концентрации кадмия в соломе устойчивых сортов при загрязнении 50 мг Cd/кг почвы была в 2 раза меньше, чем у чувствительных. Это подтверждено при сравнении групп контрастных сортов ($p \le 0.05$), однако между крайними сортами из этих групп (Местный и Malva) значимых различий выявить не удалось. Сопоставить загрязнение кадмием зерна в этом варианте опыта не представлялось возможным, т.к. у чувствительных сортов зерно не сформировалось. Тем не менее, следует отметить, что накопление кадмия в зерне на 2 порядка превышало установленную гигиеническими требованиями безопасности продовольственного сырья и продуктов норму (0.1 мг/кг) [14].

Иные закономерности отмечены в варианте с концентрацией кадмия в почве 25 мг/кг. Содержание кадмия в соломе устойчивых и чувствительных сортов значимо не различалось. Более отчетливо эти различия проявились при анализе содержания кадмия в зерне, поскольку устойчивые сорта накапливали на порядок меньше кадмия, чем чувствительные ($p \le 0.05$). Из полученных данных следует, что одна из причин различий сортов ячменя по устойчивости связана с особенностями накопления кадмия в тканях растений. Этот тяжелый металл накапливался в соломе в концентрациях, значительно превышающих концентрации в почве, в генеративные органы его переходило существенно меньше [3]. Видимо, барьерную роль играет проводящая система растения, ограничивающая поступление кадмия в генеративные органы.

Биохимические параметры. Вызванные ТМ фитотоксические эффекты проявлялись в первую очередь на клеточном уровне. В частности, тяжелые металлы нарушают функционирование ферментов, индуцируют образование свободнорадикальных и перекисных соединений. Результатом этого являются множественные повреждения биополимеров, нарушения ферментативных циклов метаболизма и оксидативный стресс. Одним из соединений, которые участвуют в нейтрализации стрессовых воздействий, является пролин [15].

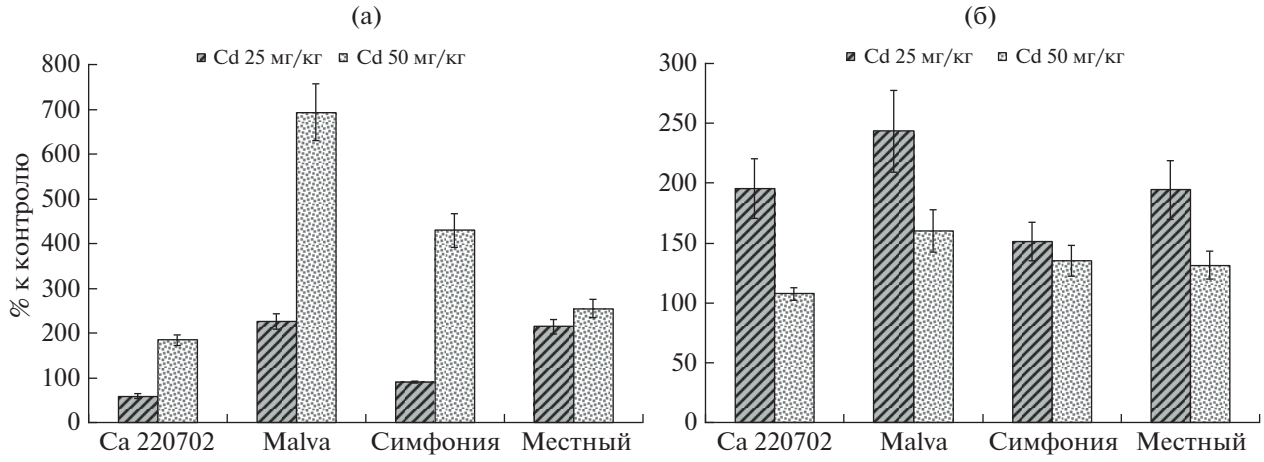

Рис. 1. Содержание пролина (а) и МДА (б) в надземной биомассе 4-х сортов ярового ячменя.

Содержание пролина в листьях ячменя ожидаемо возрастало с увеличением концентрации кадмия в почве (рис. 1а). Уже в варианте 25 мг Cd/кг у наиболее чувствительного сорта Malva концентрация пролина возрастала в 2 раза (однако у 2-х других сортов этот показатель не отличался значимо от контроля). При дозе 50 мг Cd/кг концентрации пролина в листьях увеличились в 2–7 раз, что очевидно было связано с увеличением стрессовой нагрузки. При этом различий между группами устойчивых и чувствительных сортов по этому показателю выявить не удалось, более того, была отмечена несколько парадоксальная закономерность. У одного из чувствительных сортов Са 220702 зафиксировано самое низкое содержание пролина из всех 4 сортов, в то время как у другого (Malva) оно оказалось самым высоким. Следует заметить, что у последнего сорта и содержание МДА было максимальным (рис. 1б). Таким образом, высокие уровни содержания пролина у этого сорта видимо связаны со значительной чувствительностью к стрессу. В наших исследованиях с другими культурами (конские бобы, салат, редис), связанных с анализом воздействия свинца, уже при концентрации 50 мг Pb/кг почвы также отмечали резкое увеличение концентрации пролина, вполне объяснимое с точки зрения его роли как защитного соединения [16].

При концентрации 25 мг Cd/кг почвы у всех 4-х сортов содержание МДА существенно (в 1.5–2.5 раза) возрастало по сравнению с контролем. В целом содержание данного метаболита было несколько меньше у устойчивых к кадмию сортов, но различия не были статистически значимыми. Минимальное содержание МДА зафиксировано у сорта Симфония. При концентрации 50 мг Cd/кг у всех сортов содержание МДА снижалось, хотя и оставалось больше контроля в 1.1–1.7 раза. Различие между чувствительными и устойчивыми сортами в этом варианте становится еще менее заметным. Снижение концентрации МДА в растениях с увеличением содержанием кадмия в среде обитания было обнаружено и в работе [17].

Таким образом, анализ биохимических параметров не позволил связать устойчивость сортов ячменя с содержанием пролина и МДА. Из этого можно сделать вывод, что реакция на воздействие кадмия определяется иными физиологическими процессами и требует дополнительного изучения.

Морфологические показатели растений. Внешний вид растений ярового ячменя через 50 сут после всходов показан на рис. 2. Фотографии даны для варианта 50 мг Cd/кг, поскольку именно в этом случае различия между сортами были наиболее очевидными. В варианте 25 мг Cd/кг визуально различия не обнаружены, хотя у чувствительных сортов образование колосьев происходило на 1–2 нед позже. В целом на этом этапе органогенеза были заметны существенные различия во внешнем виде растений, особенно по высоте. Видно, что устойчивые сорта (рис. 2а) показали меньшее угнетение по сравнению с чувствительными (рис. 2б). Следовательно, доза 50 мг Cd/кг является достаточной для обнаружения эффектов воздействия кадмия и дифференциации сортов на устойчивые и чувствительные. Данная концентрация кадмия может считаться критической, вызывающей значимое угнетение процессов роста и развития растений ячменя, но еще не приводящей к их гибели. В то же время доза 25 мг Cd/кг не позволила с уверенностью обнаружить визуальные различия. Есть основания полагать, что использовать более высокие концентрации для изучения действия кадмия нет

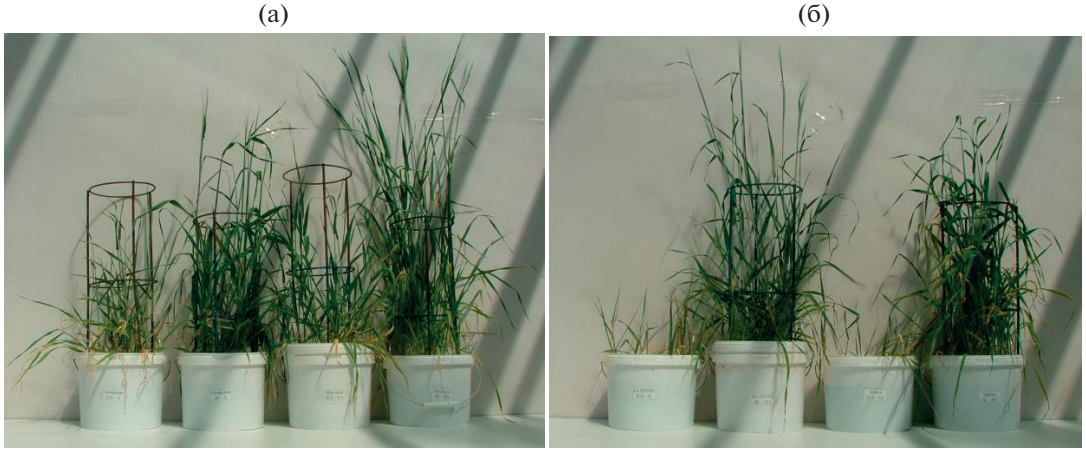

Рис. 2. Внешний вид растений ячменя на 50-е сут эксперимента: (а) – устойчивые сорта, слева направо: сорт Симфония (50 мг Cd/кг), сорт Симфония (контроль), сорт Местный (50 мг Cd/кг), сорт Местный (контроль); (б) – чувствительные сорта: сорт Са 220702 (50 мг Cd/кг), сорт Са 220702 (контроль), сорт Malva (50 мг Cd/кг), сорт Malva (контроль).

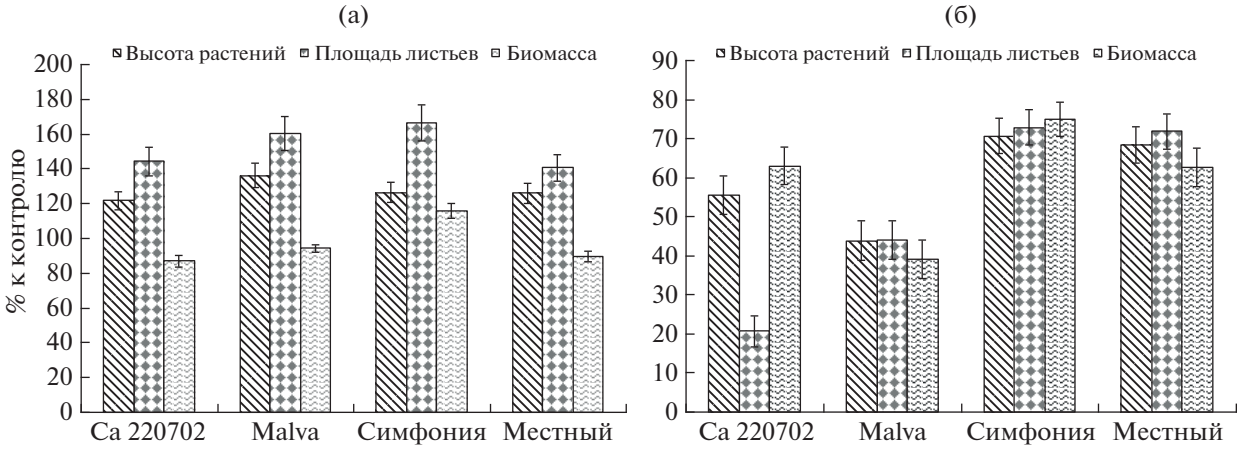

Рис. 3. Влияние загрязнения кадмием на высоту, площадь листьев и биомассу растений ячменя контрастных по устойчивости сортов: (а) – 25 мг Cd/кг, (б) – 50 мг Cd/кг.

смысла, поскольку они вызовут гибель растений. Более того, уже при дозе 50 мг Cd/кг урожай зерна удалось сформировать только устойчивым сортам, и дальнейшее увеличение содержания кадмия в почве способно обеднить потенциальный объем данных, которые можно получить в исследовании.

Морфометрические показатели. На рис. 3 приведены количественные данные, подтверждающие визуальные наблюдения о влиянии кадмия на морфометрические показатели 4-х контрастных по устойчивости сортов ячменя. При концентрации 25 мг Cd/кг не удалось выявить значимых различий между устойчивыми и чувствительными сортами всех 3-х показателей (рис. 3а). Только один из устойчивых сортов (Симфония) статистически значимо ($p < 0.05$) превосходил оба чувствительных сорта по биомассе. Т.е. этой дозы кадмия недостаточно для формирования заметных различий в ответных реакциях контрастных сортов. Необходимо также отметить, что концентрация кадмия 25 мг/кг индуцировала заметный стимулирующий эффект по показателям “высота растений” и “площадь листьев”, которые, в зависимости от сорта, увеличились на 120–170% по сравнению с контролем.

Увеличение концентрации кадмия до 50 мг/кг вело к явному угнетению развития как чувствительных, так и устойчивых сортов. Величины всех 3-х анализированных морфометрических показателей у всех сортов были статистически значимо меньше контроля (рис. 3б). При этом внутриви-

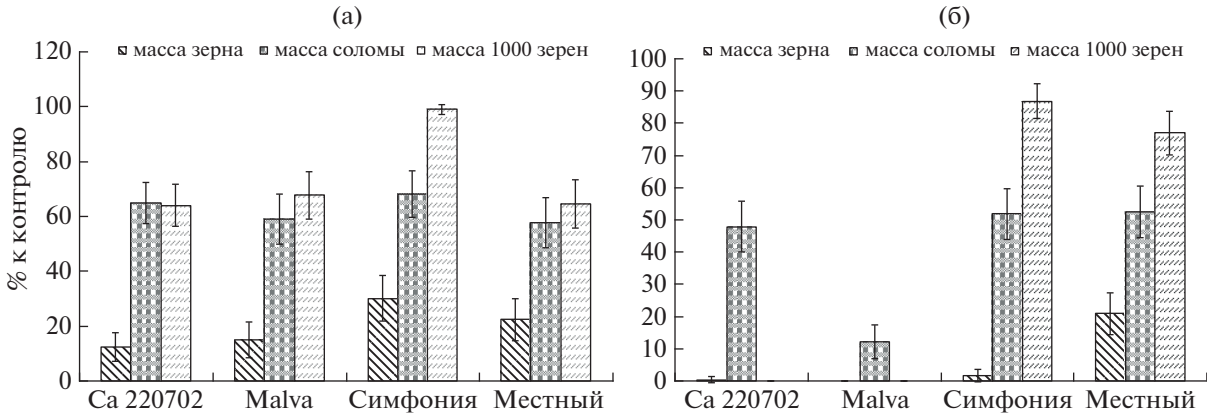

Рис. 4. Влияние кадмия на основные показатели продуктивности 4-х сортов ярового ячменя: (а) – 25 мг Cd/кг, (б) – 50 мг Cd/кг.

довые особенности ответа растений на токсический стресс становились очевидными. Все исследованные показатели устойчивых сортов статистически значимо ($p < 0.05$) превосходили чувствительные. Наиболее заметными были различия по площади листьев: величина этого показателя устойчивых сортов была почти в 2 раза больше, чем чувствительных. Сходную закономерность показала и высота растений, хотя в этом случае отличия в ответе на действие кадмия проявляются не столь отчетливо. Менее всего дифференциация между группами контрастных сортов была заметна по биомассе. В этом случае один из чувствительных сортов Са 220702 практически не отличался от устойчивых.

Таким образом, по чувствительности к действию кадмия изученные показатели можно выстроить в следующий ряд. Сильнее всего на токсический стресс реагировала площадь листьев, и именно при ее анализе была заметна наибольшая разница между устойчивыми и чувствительными сортами. В меньшей степени изменялась высота растений, хотя и по этому критерию устойчивые сорта статистически значимо превосходили чувствительные. Биомасса изменяется не столь сильно, и в некоторых случаях она у чувствительных сортов могла сохраняться на уровне, близком к устойчивым сортам.

Из полученных данных можно сделать вывод, что различия между устойчивыми и чувствительными сортами уверенно выявлены на уровне организма, когда концентрация кадмия в среде достигла критического уровня. В то же время, пока концентрация кадмия недостаточно велика, существенных различий между устойчивыми и чувствительными сортами не наблюдали. В этих условиях растения успешно справлялись со стрессовой нагрузкой, а неспецифические механизмы защиты, отвечающие за предотвращение проникновения во внутреннюю среду нежелательных веществ, оказались достаточно эффективными. При этом особенности ответа растений ячменя на токсическое действие кадмия, описанные ранее для проростков [6], сохранялись и у взрослых растений.

Структура урожая. Особый интерес представляют результаты, полученные в конце цикла вегетации. На их основе можно сделать вывод о том, сохраняется ли устойчивость или чувствительность каждого сорта на протяжении всей жизни растений, и как эти особенности сказываются на хозяйственно ценных качествах. Так же, как и в остальных случаях, загрязнение почвы кадмием в концентрации 25 мг/кг не привело к существенным различиям между группами контрастных по устойчивости сортов ячменя (рис. 4а). Однако следует отметить, что масса зерна у устойчивых сортов была заметно больше, чем у чувствительных, а по массе 1000 зерен сорт Симфония значимо ($p < 0.05$) превосходил остальные сорта. Более того, лишь у сорта Симфония этот показатель сохранился на уровне контроля, в то время как у всех остальных сортов снизился до 70%.

Значительно более информативным оказался вариант с внесением 50 мг Cd/кг кадмия (рис. 4б). В этом случае наблюдали явно выраженное подавление развития чувствительных сортов. Устойчивые сорта тоже показали угнетение, но не столь значительное. Например, у чувствительных сортов урожая зерна получить не удалось совсем (или он был исчезающее мал), в то время как у устойчивых сортов масса зерна составила ≈20% от контроля. Стоит заметить, что сорт Симфония и в этом случае показал свои выдающиеся качества,

поскольку у него масса 1000 зерен составила >90% от контроля. На основе полученных данных можно утверждать, что сорт Симфония обладает высокой устойчивостью к токсическому действию кадмия, и, как это было выявлено в нашей предыдущей работе [7], к свинцу.

Результаты оценки массы соломы были не столь наглядны, тем не менее на рис. 4б видно, что чувствительные сорта формировали меньшую биомассу, чем устойчивые. Причем масса соломы сорта Са 220702 незначительно уступала устойчивым сортам. Однако масса соломы сорта Malva составила ≈10% от контроля (у сорта Симфония она была равна ≈50%). Стоит отметить, что устойчивые сорта в меньшей степени поражались болезнями (листовой ржавчиной), чем чувствительные, причем различие было наиболее отчетливым при дозе 50 мг Cd/кг. Интересно, что в варианте 25 мг Cd/кг поражение болезнями оказалось менее выраженным, чем в контроле. Вероятно, такая концентрация кадмия стимулирует защитные силы растения, которое лучше противостоит заражению, а при высокой концентрации поллютанта возбудители болезни легко поселяются на ослабленном растении.

Таким образом, концентрация кадмия 50 мг/кг являлась критической для ячменя при выращивании на дерново-подзолистой почве и позволила уверенно разделить контрастные по устойчивости сорта к этому ТМ. При этом все сорта сохраняли свойства устойчивых или чувствительных к кадмию на протяжении всего жизненного цикла. Из рассмотренных сортов сорт Симфония показал наибольшую устойчивость к токсическому действию кадмия, а сорт Malva, напротив, остро реагировал на загрязнение почвы этим тяжелым металлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что обнаруженная при оценке воздействия кадмия на проростки дифференциация сортов ячменя на устойчивые и чувствительные сохранялась на протяжении всего жизненного цикла растений. Обнаружены существенные различия уровней накопления кадмия в тканях растений ячменя. Причем как в соломе (при концентрации 50 мг Cd/кг почвы), так и особенно в зерне, устойчивые сорта накапливали в разы меньше кадмия, чем чувствительные. Эффективная работа защитных систем устойчивых сортов, ограничивающих поступление кадмия в растение, позволяла им успешно завершить жизненный цикл и дать урожай зерна даже в условиях высоких концентраций кадмия в почве. В то же время развитие чувствительных сортов фактически останавливалось в фазе кущения, и колос большинства сортов не формировался. Из этого следует, что формирование внутривидового полиморфизма по устойчивости к действию кадмия в значительной степени связано со способностью предотвращать избыточное накопление токсических элементов в тканях растений.

Анализ содержания в тканях растений пролина и малонового диальдегида хотя и показал реакцию растений на вызванный кадмием стресс, однако не позволил связать устойчивость исследованных сортов ячменя с величиной этих параметров. Из этого следует, что устойчивость растений ячменя к кадмию не связана прямо с выработкой пролина или накоплением малонового диальдегида, а контролируется иными физиолого-биохимическими процессами. Вопрос о молекулярно-клеточных механизмах формирования ответной реакции растений на повышенные концентрации тяжелых металлов требует дополнительного изучения.

По чувствительности к действию кадмия морфометрические показатели растений ячменя можно выстроить в следующий ряд: площадь листьев > высота растений > биомасса. Особенно отчетливо различия между контрастными сортами проявились при анализе показателей продуктивности. При концентрации 50 мг Cd/кг урожай зерна растений чувствительных сортов получить не удалось, в то время как устойчивые сорта хотя и были угнетены, но продуктивность сохранили. Значительно уменьшалась у чувствительных сортов и масса соломы по сравнению как с контролем, так и с устойчивыми сортами.

В целом проведенное исследование показало существенные различия сортов ячменя как по накоплению кадмия в соломе и, особенно, в зерне, так и по реакции повышенных концентраций кадмия на продуктивность растений. Полученные результаты могут быть полезными при планировании сельскохозяйственного производства на техногенно-загрязненных почвах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серегин И.В., Иванов В.Б.* Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
2. *McLaughlin M.J., Parker D.R., Clarke J.M.* Metals and micronutrients – food safety issues // Field Crops Res. 1999. V. 60. P. 143–163.
3. *Wagner G.J.* Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health // Adv. Agron. 1993. V. 51. P. 173–212.

4. *Clemens S.* Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // Biochimie. 2006. V. 88. P. 1707–1719.
5. *Санжарова Н.И., Цыгвинцев П.Н.* Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. 398 с.
6. *Dikarev A.V., Dikarev V.G., Dikareva N.S.* The assessment of cadmium nitrate effect on morphological and cytogenetical indexes of spring barley seedlings // Brazil. J. Botany. 2020. https.doi.org/10.1007/s40415-020-00679-4
7. *Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А.* Внутривидовой полиморфизм ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) по устойчивости к действию свинца // Сел.-хоз. биол. 2014. № 5. С. 78–87.
8. *Журбицкий З.И.* Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 260 с.
9. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / Под ред. Артюшина А.М. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
11. *Bates L.S., Waldern R.P., Teare I.D.* Rapid determination of free proline for water-stress studies // Plant and Soil. 1973. V. 39. № 1. P. 205–207.
12. *Heath R.L., Packer L.* Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // Arch. Biochem. Biophys. 1968. V. 125. № 1. P. 189–198.
13. *Иванов А.И., Суханов П.А., Иванова Ж.А., Яковлева Т.И.* Агроэкологическое значение окультуривания песчаных дерново-подзолистых почв при загрязнении Pb и Cd // Агрохимия. 2019. № 4. С. 70–78.
14. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: санитарно-эпидемиологические правила и нормы. М.: Минздрав РФ, 2002. 164 с.
15. *Кузнецов В.В., Шевякова Н.И.* Пролин при стрессе: биологическая роль, метаболизм, регуляция // Физиология растений. 1999. Т. 46. № 2. С. 321–336.
16. *Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С.* Исследование фитотоксичности свинца для растений редиса и салата при выращивании на разных типах почв // Агрохимия. 2019. № 6. С. 72–80.
17. *Ху Ж.Цз., Пей Д.Л., Лиан Ф., Ши Г.С.* Влияние загрязнения воды кадмием на рост растений *Sagittaria sagittifolia* // Физиология растений. 2009. Т. 56. № 5. С. 759–767.

Differentiation of Barley Varieties in Resistance to Cadmium is Remain the Same during the Whole Life Cycle of Plants

S. A. Geras'kin[a,#], A. V. Dikarev[a], and M. A. Lychenkova[a]

[a] *Russian Institute of Radiology and Agroecology*
Kievskoe Shosse, 109 km, Obninsk, Kaluga Region 249032, Russia
[#] *E-mail: stgeraskin@gmail.com*

To answer the question: will the varieties selected on the basis of the seedlings study show similar reactions to the action of cadmium throughout the entire life cycle, in the vegetation experiment we studied the concentration of cadmium in plants, biochemical, morphological and productive indicators of four varieties of spring barley contrasting in cadmium resistance. Significant differences in the levels of cadmium accumulation in plant tissues were found. It was found that a cadmium concentration of 50 mg/kg of sod-podzolic soil is critical for barley and allows one to confidently separate varieties that are contrast in resistance to this heavy metal. Differences between resistant and sensitive varieties are manifested at the organism level (leaf area, plant height, yield structure). Differences between contrasting varieties in biochemical parameters were not found.

Key words: barley, cadmium, leaf area, plant height, yield structure, proline, malondialdehyde.

АГРОХИМИЯ, 2021, № 2, с. 86–93

Экотоксикология

УДК 631.86:579.222

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ БИОКОНВЕРСИИ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ В КАЧЕСТВЕ БИОУДОБРЕНИЙ ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ[1]

© 2021 г. А. В. Богородская[1,*], О. В. Киселёва[2]

[1] Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036 Красноярск, Академгородок, 50/28, Россия

[2] Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва 660049 Красноярск, просп. Мира, 82, Россия

**E-mail: anbog@ksc.krasn.ru*

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.
После доработки 27.08.2020 г.
Принята к публикации 10.11.2020 г.

Исследована возможность применения биоудобрений, полученных в результате твердофазного культивирования некоторых штаммов ксилотрофных базидиомицетов, для повышения продуктивности и биологической активности деградированных почв на примере вскрышных пород Бородинского буроугольного разреза. Внесение микопродуктов и отработанных субстратных блоков, а также опилок повышало грунтовую всхожесть семян сосны обыкновенной на 10–50%, увеличивало в 2–3 раза сохранность сеянцев, а также их морфометрические параметры и биомассу. Применение биоудобрений повышало биогенность и функциональную активность микробоценоза грунтов, особенно заметно в вариантах с микопродуктом на основе *T. versicolor* и субстратными блоками *P. eryngii*.

Ключевые слова: деградированные почвы, биоудобрение, микопродукт, всхожесть и сохранность сеянцев, почвенная микробная биомасса, базальное дыхание, численность эколого-трофических групп микроорганизмов.

DOI: 10.31857/S0002188121020046

ВВЕДЕНИЕ

Россия является одной из ведущих стран мира по объему заготавливаемой древесины. При существующих способах переработки древесного сырья до 60% биомассы составляют отходы, 20% из которых приходится на опилки [1]. В данный момент основная масса опилок складируется и превращается в не утилизируемый отход производства, который, помимо экологической, представляет еще и пожарную опасность. Для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду необходимо сокращать долю не утилизированных отходов, широко вовлекая их в глубокую переработку. Одним из многообещающих способов утилизации опилок, позволяющих решить несколько важных задач, следует считать их прямую биоконверсию базидиальными грибами-ксилотрофами с получением органических и органоминеральных удобрений для сельского и лесного хозяйств.

Развитие идей микробиологической биотрансформации древесных отходов с последующим использованием их в качестве биоудобрений прослежена в работах отечественных ученых [2–7]. Предлагаемые методы основаны на биодеградации древесных отходов как аборигенными культурами почвенных микроорганизмов, так и выделенными из естественных мест обитания штаммами грибов с высокой дереворазрушающей активностью [6, 8, 9]. Также перспективным видится направление биоконверсии лигноцеллюлозных субстратов с использованием съедобных базидиомицетов, которое позволяет эффективно совмещать технологии утилизации растительных отходов лесопереработки и получения кормовых и высококачественных пищевых продуктов [10–12], при этом отработанные ферментированные субстраты, обогащенные мицелиальной биомассой, могут быть использованы в качестве биоудобрений.

При твердофазном культивировании ксилотрофных грибов на опилках и растительных суб-

[1] Работа выполнена по базовому проекту № 0356-2019-0027.

стратах возможно получить микопродукт (**МП**), который самостоятельно или в качестве добавки к другим субстратам можно использовать как биоудобрение при лесовыращивании и в сельском хозяйстве [13]. Биоудобрение способствует обогащению почвы не только элементами питания, но и микрофлорой, является стабилизатором биологической активности почвы, улучшает ее агрофизические и агрохимические свойства [5]. В МП происходит частичная деградация лигноцеллюлозного комплекса, снижается содержание и легко- и трудногидролизуемых полисахаридов, увеличивается количество экстрактивных веществ, снижается содержание лигнина [4, 8, 14, 15], разрушаемая древесина обогащается грибным мицелием, иммобилизованным естественным образом на субстрате [11, 12, 16]. Оба компонента системы по отдельности рассматриваются как перспективные сорбенты тяжелых металлов, нефти, органических загрязнителей-ксенобиотиков [4]. Сочетание биологической деструкции и обогащения грибной биомассой позволяет ожидать увеличения сорбирующей активности продуктов биоконверсии и (или) проявления у них качественно новых свойств.

Цель работы – оценка возможности применения биоудобрений, полученных в результате твердофазного культивирования некоторых штаммов ксилотрофных базидиомицетов, для повышения продуктивности и биологической активности деградированных почв на примере вскрышных пород Бородинского буроугольного разреза (**БУР**).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Биоудобрения на основе МП получали путем твердофазного культивирования мицелия ксилотрофных базидиальных грибов *Trametes versicolor* и РО-4.1 *Pleurotus ostreatus* на свежих увлажненных сосновых и березовых опилках соответственно для разных грибов в течение 2.5 мес. при 25°С. Для приготовления субстрата для культивирования *T. versicolor* измельченные сосновые опилки на 12 ч замачивали в разбавленном в 10 раз сусле, прогревали, отжимали, вносили измельченный чистотел (5% по объему) для усиления лигнолитической активности [14], раскладывали в 3-литровые банки и стерилизовали дробно дважды с интервалом в 1 сут в течение 40 мин каждый раз при температуре 120°С и давлении 1 атм. Для культивирования *P. ostreatus* измельченные березовые опилки на 1 сут замачивали в водопроводной воде, отжимали, раскладывали в 3-литровые банки и стерилизовали как описано выше. Перед засевом гриба вносили 5%-ный раствор NH_4NO_3. Засев проводили предварительно выращенными 10-суточными культурами грибов на сусло-агаре в соотношении 2% от объема. Культивировали в течение 2.5 мес. при 25°С [17]. Затем мицелиально-опилочную массу (микопродукт) измельчали и высушивали до воздушно-сухого состояния.

В эксперименте также использовали отработанные субстратные блоки (**СБ**) после культивирования РО-22 *Pleurotus eryngii* (DC.) Quél. Субстратные блоки состояли из отходов лесопереработки без тщательного разделения по породам с добавлением некондиционного зерна (пшеницы, овса) и хвои после извлечения масел [12].

В пластиковые контейнеры помещали измельченный и просеянный через 3 мм сито грунт (вскрышные породы БУР, расположенного в пределах Канско-Рыбинской котловины, на восточной окраине лесостепной зоны Средней Сибири [18]) (вариант “контроль”), смешанный с 5% по весу с сосновыми и березовыми опилками (варианты “ОП сосна” и “ОП береза”), а также с внесением 5% по весу МП грибов *T. versicolor* (вариант “МП *T. versicolor*”), *P. ostreatus* (вариант “МП *P. ostreatus*”) и СБ *P. eryngii* (вариант “СБ *P. eryngii*”).

Семена сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), предварительно обработанные фунгицидом (флудиоксонил), высевали в разные варианты грунта с добавками по 20 семян в 6-ти повторностях, субстрат увлажняли до 60% и оставляли для прорастания при комнатной температуре 25°С. Учет грунтовой всхожести проводили на 26-е сут. Повторный учет для определения сохранности сеянцев проводили на 52-е сут от начала эксперимента. У оставшихся сеянцев сосны проводили морфометрические измерения по следующим параметрам: длина корневой системы, стволика и мутовки. Также определяли биомассу сеянцев, которую учитывали стандартными методами [19].

Во всех вариантах грунта с добавками биоудобрений после снятия эксперимента определяли содержание микробной биомассы ($\mathbf{C_{микр}}$), интенсивность базального дыхания (**БД**), подробная методика которых описана ранее [20, 21]. Также изучали общую численность и структуру эколого-трофических групп микроорганизмов (**ЭКТГМ**) на диагностических средах [22], определяли влажность субстрата (105°С, 8 ч) и pH потенциометрическим методом.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Excel 10. Достоверность полученных результатов оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $P = 0.05$.

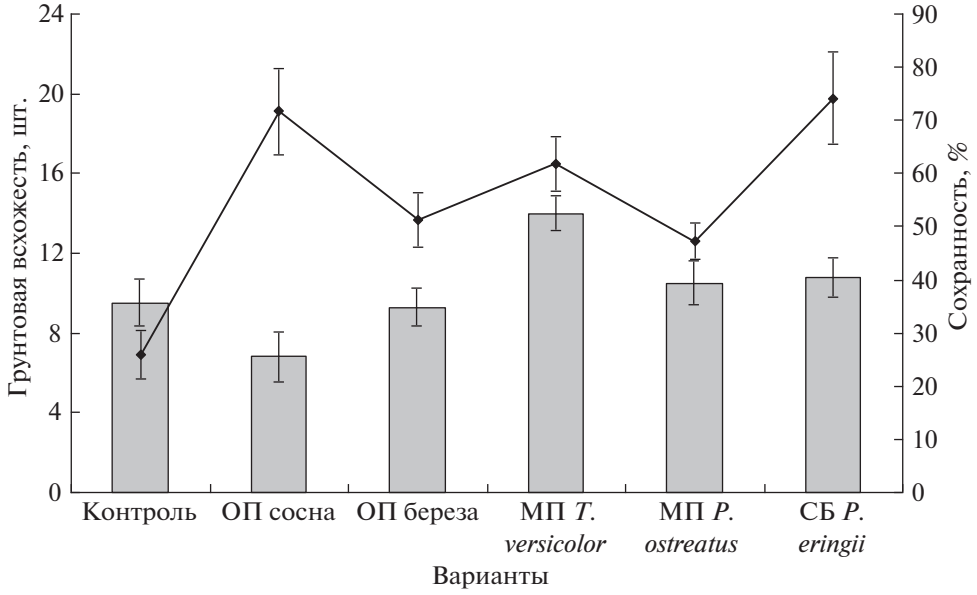

Рис. 1. Грунтовая всхожесть семян сосны обыкновенной (диаграмма) и сохранность сеянцев (график) в разных вариантах грунта с добавками биоудобрений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полное уничтожение почвенного покрова и техногенное формирование ландшафта, начатое с "ноль-момента" наблюдается при открытой разработке каменноугольных месторождений [23]. Рекультивационные работы начинаются с отсыпки отвалов вскрышными породами (горнотехнический этап), которые весьма неоднородны по гранулометрическому составу и химическим свойствам [24]. Формирующиеся при разработке каменного угля отвалы представляют собой хаотичную смесь вскрышных пород антропогена, неогена, палеогена и др. [25]. Отвалы БУР сложены широким спектром горных пород: алевролитами серого цвета, техногенной смесью горных пород четвертичного возраста – суглинков, глин, супесей, песков, остатков угля и угольной пыли [24]. Установлено, что отвалы вскрышных пород БУР обладают исходным плодородием (по содержанию гумусовых веществ, азота, калия и фосфора, гранулометрическому составу) и не токсичны для высших растений [26]. Для лесного направления рекультивации отвалы оставляют без нанесения плодородного слоя почвы (литостраты) под самозарастание либо высаживают лесные культуры. Бедность породы в первую очередь доступными формами азота, а также минерализованность поверхности отвалов предопределяют естественное развитие березы, сосны и облепихи [27].

Для повышения почвенного плодородия и производительного потенциала грунтов отвалов, а также увеличения грунтовой всхожести семян и сохранности сеянцев целесообразно использование биоудобрений как агентов, стимулирующих биогенность почвы.

Полученные МП на основе ксилотрофных базидиомицетов отличались от исходного материала (опилок): количество экстрактивных веществ в МП *T. versicolor* превышало таковое в опилках в 2 раза, в то время как содержание трудноразлагаемых веществ (лигнина и целлюлозы) было снижено на 12–13% [14], в МП *P. ostreatus* снизилось содержание и легко- и трудногидролизуемых полисахаридов на 4–15%, количество лигнина уменьшилось почти на 10%, и МП обогатился доступными формами азота [28].

Добавление в грунт вскрышных пород БУР МП и отработанных СБ увеличивало всхожесть семян сосны обыкновенной (рис. 1). Максимальное (на 47% от контроля) и статистически достоверное увеличение всхожести наблюдали в варианте "МП *T. versicolor*". В варианте "ОП сосна" всхожесть снижалась на 28%, что, вероятно, было вызвано угнетающим влиянием экстрактивных веществ древесины сосны, которые задерживают прорастание. Всхожесть в варианте "ОП береза" была также несколько меньше контроля.

Ситуация менялась к концу эксперимента: максимальная сохранность сеянцев сосны (72–74%) отмечена в вариантах "ОП сосна" и "СБ *P. eryngii*". Вероятно, экстрактивные вещества из древесины сосны и остатки грибного мицелия *P. eryngii* обладали ингибирующим влиянием на услов-

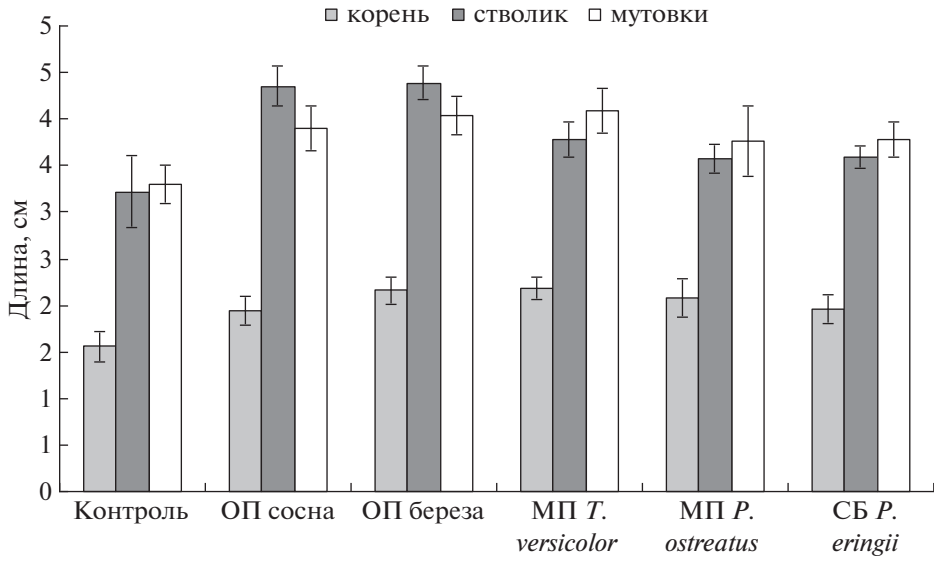

Рис. 2. Морфометрические параметры сеянцев в разных вариантах грунта с добавками биоудобрений.

но-патогенную микрофлору, повышая устойчивость сеянцев сосны к патогенам. В варианте "МП *T. versicolor*" сохранность сеянцев достигала 62%, что было в 2.5 раза больше, чем в контроле. В вариантах "ОП береза" и "МП *P. ostreatus*" сохранность сеянцев была больше контроля в 1.8–2.0 раза. В целом внесение разных вариантов органических биоудобрений достоверно ($P = 0.05$) повышало сохранность сеянцев сосны.

Анализ морфометрических параметров оставшихся проростков показал, что во всех вариантах добавления биоудобрений длина корневой системы достоверно ($P = 0.05$) была больше контроля (рис. 2). Достоверное удлинение стволиков наблюдали только в вариантах с добавлением опилок, мутовок – во всех вариантах, кроме "МП *P. ostreatus*".

Общая биомасса всех сеянцев сосны обыкновенной была достоверно больше контроля во всех вариантах добавок (рис. 3). Наиболее высокая общая биомасса сеянцев, в 3.5–4.4 раза превышающая контроль, отмечена в вариантах "МП *T. versicolor*" и "СБ *P. eryngii*". Похожая тенденция сохраняется и для биомассы одного проростка.

Исследование параметров биологической активности грунта после внесения биоудобрений позволило как дать оценку функциональных изменений на различные воздействия, так и определить стратегию их восстановления [27, 28]. Для ранней диагностики состояния и определения критических пределов сбалансированного функционирования почв рекомендуется использование содержания микробной биомассы и ее активности [20, 29], параметров, которые в ряде зарубежных стран имеют статус стандарта для определения качества почвы [30].

Исследование функциональных характеристик микробоценоза вскрышных пород БУР после снятия эксперимента по внесению биоудобрений демонстрировало достоверное увеличение содержания $C_{микр}$ (исключая вариант "ОП сосна") и интенсивности БД во всех исследованных вариантах (рис. 4). Наибольшее увеличение рассматриваемых параметров почвенного микробоценоза отмечено в вариантах "МП *P. ostreatus*" и "СБ *P. eryngii*": в 2–3.3 раза для $C_{микр}$ и в 4.0–8.5 раза – для БД, что, вероятно, было связано как с активизацией аборигенной микрофлоры на внесение дополнительного органического вещества, так и с содержанием остатков живого мицелия базидиальных грибов.

Влияние внесения разных вариантов биоудобрений в грунт БУР проявилось и на показатели структуры и численности основных эколого-трофических групп микроорганизмов (рис. 5). Численность гидролитической микрофлоры, представленная быстрорастущими грибами, грамположительными спорообразующими и некоторыми грамотрицательными бактериями и актиномицетами, возрастала во всех вариантах внесения биоудобрений, но особенно заметно в варианте "СБ *P. eryngii*", где она достигала 31 млн КОЕ/г, что было в 10 раз больше контроля. Гидролитические микроорганизмы способны к биосинтезу внеклеточных гидролаз и являются первичными редуцентами в цепи разложения поступившего в поч-

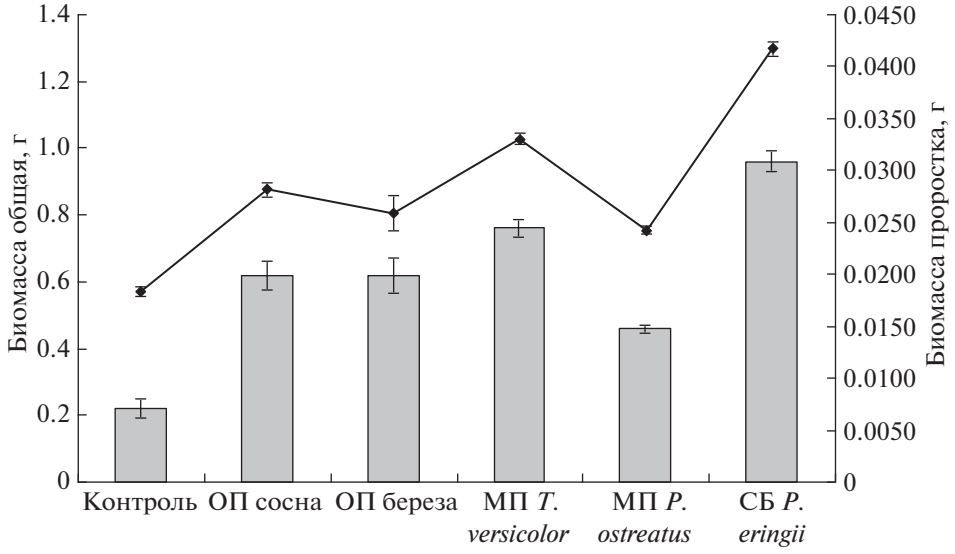

Рис. 3. Общая биомасса сеянцев сосны обыкновенной (диаграмма) и одного проростка (график) в разных вариантах грунта с добавками биоудобрений.

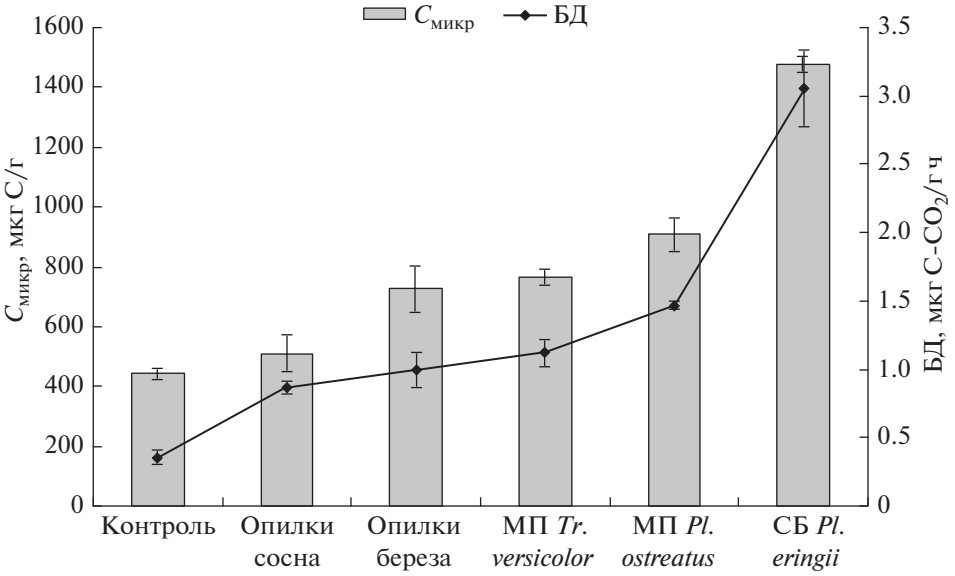

Рис. 4. Содержание углерода микробной биомассы (диаграмма) и интенсивность БД (график) разных вариантов грунта с добавками биоудобрений в конце вегетации.

ву органического вещества. Численность копиотрофов – микрофлоры, характеризующейся высокой скоростью потребления мономеров при их высокой концентрации в окружающей среде, была практически сравнима с контролем в разных вариантах, исключая варианты "ОП береза" и "МП *P. ostreatus*", где она заметно снизилась. Численность олиготрофных групп микроорганизмов, имеющих систему активного транспорта мономерных соединений внутрь клетки при их низкой концентрации в окружающей среде, во всех вариантах внесения биоудобрений была больше контроля, при этом отношение их численности к количеству гидролитических микроорганизмов заметно снижалось почти во всех вариантах (исключая вариант "ОП сосна"), особенно заметно в варианте "СБ *P. eryngii*", что свидетельствовало о снижении олиготрофности почвогрунта в отношении азота и доступного органического вещества. Стоит обратить внимание, что кислотность водной вытяжки грунта уменьшалась на 0.1–0.3 ед. в вариантах с МП и СБ и

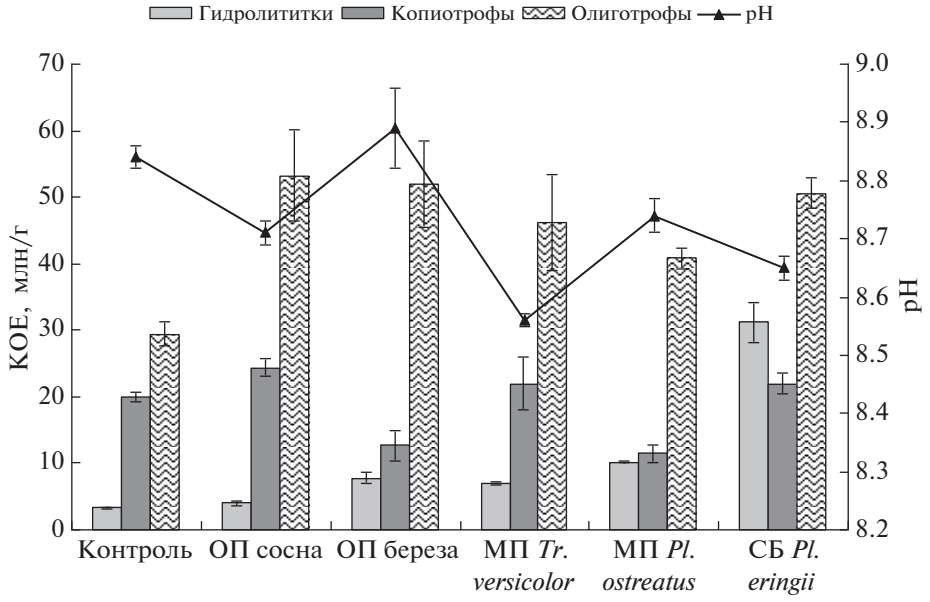

Рис. 5. Структура и численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов (диаграмма) и кислотность водной вытяжки (график) в разных вариантах грунта с добавками биоудобрений в конце вегетации.

сосновыми опилками, при этом величина pH оставалась в слабощелочном диапазоне.

В целом отмеченное увеличение численности гетеротрофных микроорганизмов в основном за счет гидролитической группировки, обладающей *r*-стратегией, свидетельствовало о начальном этапе преобразований в почвенном микробном комплексе в ответ на внесение биоудобрений в грунт БУР. Численность активных деструкторов органического вещества в вариантах с внесением МП и СБ в грунте была сравнима с таковой в разновозрастных реплантоземах и литостратах рекультивированных отвалов БУР и в фоновых почвах исследованной лесорастительной зоны [21, 31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внесение микопродуктов и отработанных субстратных блоков, а также опилок повышало грунтовую всхожесть семян сосны обыкновенной на 10–50%, увеличивало сохранность сеянцев, а также их морфометрические параметры и биомассу. Наибольшее увеличение морфометрических параметров и биомассы отмечено в вариантах "МП *T. versicolor*" и "СБ *P. eryngii*". Применение биоудобрений увеличивало биогенность и функциональную активность микробоценоза грунтов, особенно заметно в вариантах с применением микопродукта и субстратных блоков.

Возможность применения биоудобрений, полученных путем биоконверсии продуктов лесопереработки, позволит увеличить продуктивность и биологическую активность деградированных почв и грунтов техногенных территорий, а также будет способствовать сохранности как естественных всходов, так и саженцев при искусственном лесовозобновлении. В перспективе использование биоудобрений может найти применение при выращивании посадочного материала в лесопитомниках.

Полученный заметный положительный эффект от внесения в деградированные почвогрунты отработанных ферментированных субстратов, обогащенных мицелиальной биомассой – отходов от выращивания пищевых базидиомицетов, является основанием расширить исследования возможности применения и других отходов биотехнологической переработки древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дитрих В.И., Андрияс А.А., Пережилин А.И., Корпачев В.П.* Оценка объемов и возможные пути использования отходов лесозаготовок на примере Красноярского края // Хвойные бореальной зоны. 2010. № 3–4. С. 346–351.
2. *Беловежец Л.А.* Микробиологические и экологические аспекты переработки вторичного лигноцеллюлозного сырья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2007. 22 с.
3. *Гродницкая И.Д., Пашенова Н.В., Кондакова О.Э.* Продукты биоконверсии древесных отходов хвойных в биоремедиации деградированных почв. Строение, свойства и качество древесины – 2018. Мат-лы VI Международ. симп. им. Б.Н. Уголева,

посвящ. 50-летию Регионального координационного совета по современным проблемам древесиноведения. 2018. С. 68–71.

4. *Куликова Н.А., Кляйн О.И., Степанова Е.В., Королева О.В.* Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты (обзор) // Прикл. биохим. и микробиол. 2011. Т. 47. № 6. С. 619–634.
5. *Ленскинова Л.В.* Получение биоудобрения на основе биодеструкции опилок для оптимизации деградированных почв: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2003. 22 с.
6. *Мокрушина Н.С., Тарасова Т.С., Дармов И.В.* Биоконверсия древесных отходов методом компостирования с получением органического удобрения // Изв. Самар. НЦ РАН. 2009. № 1. С. 228–232.
7. *Сенкевич О.В., Ульянова О.А., Хижняк С.В.* Оценка влияния новых видов вермикомпоста на плодородие агросерой почвы // Агрохимия. 2019. № 8. С. 24–33.
8. *Бондарь П.Н., Садыкова В.С.* Использование отходов деревообрабатывающей промышленности для создания биопрепаратов на основе грибов рода *Trichoderma* // Хвойные бореальной зоны. 2015. № 5–6. С. 286–290.
9. *Литовка Ю.А., Павлов И.Н., Рязанова Т.В., Газизулина А.В., Чупрова Н.А.* Дереворазрушающие свойства сибирских штаммов *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst // Химия раст. сырья. 2018. № 1. С. 193–199.
10. *Кудря А.М.* Биоконверсия растительных отходов при промышленном производстве грибов рода *Pleurotus*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Краснодар, 2007. 24 с.
11. *Миронов П.В., Алаудинова Е.В., Эназаров Р.Х., Саволайнен А.С.* Микробиологическая конверсия отходов деревопереработки с получением органических удобрений // Хвойные бореальной зоны. 2018. № 3. С. 275–278.
12. *Павлов И.Н., Литовка Ю.А., Мулява В.В., Сапронова И.Е., Кулаков С.С., Пашенова Н.В., Мулява В.Е.* Биоконверсия отходов лесопереработки ксилотрофным базидиомицетом *Pleurotus eryngii* (DC.) Quél // Агроэкоинфо. 2017. № 2. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/2/st_222.doc
13. *Антонов Г.И., Пашенова Н.В., Гродницкая И.Д.* Патент на изобр. РФ № 2681572 от 11.03.2019 Опилочно-почвенный субстрат для оптимизации плодородия почв // Б.И. 2019. № 8.
14. *Пашенова Н.В., Лоскутов С.Р., Пермякова Г.В., Анискина А.А.* Влияние отвара чистотела на биоконверсию сосновых опилок культурами базидиальных грибов-ксилотрофов // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья. Мат-лы IV Всерос. конф. 21–23 апреля 2009 г. Барнаул: Изд-во Алтай. ун-та, 2009. Кн. 2. С. 39–41.
15. *Colavolpe M.B., Albertó E.* Cultivation requirements and substrate degradation of the edible mushroom *Gymnopilus pampeanus* – A novel species for mushroom cultivation // Sci. Horticult. 2014. V. 180. P. 161–166.
16. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. В 2 кн. Кн. I. Древесина и разрушающие ее грибы / Под ред. Рабинович М.Л. М.: Наука, 2001. 264 с.
17. Методы экспериментальной микологии / Под ред. Билай В.И. Киев: Наукова думка, 1982. 550 с.
18. *Снытко В.А., Семенов Ю.М., Мартынов А.В.* Почвенно-географическое районирование западного участка КАТЭКа // Географ. и природн. ресурсы. 1982. № 2. С. 32–38.
19. Полевая геоботаника. Т. 3. М.–Л., 1964. 530 с.
20. *Ананьева Н.Д.* Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 222 с.
21. *Богородская А.В.* Влияние органических субстратов и бакпрепарата на биологическую активность и продуктивность отвалов угольного разреза Канской лесостепи // Агрохимия. 2018. № 8. С. 12–21.
22. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
23. *Андроханов В.А., Курачев В.М.* Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 224 с.
24. Рабочий проект рекультивации земель, нарушенных ОАО “Разрез Бородинский” в Рыбинском районе Красноярского края. Красноярск. 2005.
25. *Шугалей Л.С., Яшихин Г.И., Дмитриенко В.К.* Биологическая рекультивация нарушенных земель КАТЭКа. Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1996. 186 с.
26. *Гродницкая И.Д., Трефилова О.В., Шишикин А.С.* Агрохимические и микробиологические свойства техногенных почв отвалов (Канско-Рыбинская котловина) // Почвоведение. 2010. № 7. С. 867–878.
27. *Мурзакматов Р.Т., Шишикин А.С., Борисов А.Н.* Особенности формирования насаждений на отвалах угольных разрезов в лесостепной зоне // Сибир. лесн. журн. 2018. № 1. С. 37–49.
28. *Киселева О.В., Миронов П.В.* Биоконверсия древесных отходов с получением органических удобрений – перспективный способ их утилизации // Перспективы развития российской экономики в цифровую эпоху: Мат-лы Всерос. научн.-практ. конф. 14 декабря 2018 г. Саратов: ЦПМ “Академия Бизнеса”, 2018. С. 73–76.
29. *Гавриленко Е.Г., Ананьева Н.Д., Макаров О.А.* Оценка качества почв разных экосистем // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1505–1515.
30. *Doran J.W., Zeiss M.R.* Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality // Appl. Soil Ecol. 2000. V. 15. P. 3–11.
31. *Богородская А.В., Краснощекова Е.Н., Трефилова О.В., Шишикин А.С.* Сезонная динамика развития микробоценозов и комплексов беспозвоночных на отвалах вскрышных пород Бородинского буроугольного разреза (КАТЭК) // Географ. и природн. ресурсы. 2010. № 4. С. 36–45.

Use of Wood Waste Bioconversion Products as Biofertilizers for Remediation of Degraded Soils

A. V. Bogorodskaya[a,#] and O. V. Kiseleva[b]

[a] *V.N. Sukachev Instute of Forest of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences – a separate division of the FITC KNC SB RAS*
Akademgorodok 50/28, Krasnoyarsk 660036, Russia
[b] *M.F. Reshetnev Sibir State University of Science and Technology*
prosp. Mira 82, Krasnoyarsk 660049, Russia
[#] *E-mail: anbog@ksc.krasn.ru*

The possibility of using biofertilizers obtained as a result of solid-phase cultivation of certain strains of xylotrophic basidiomycetes to increase the productivity and biological activity of degraded soils on the example of overburden rocks of the Borodino brown coal section is investigated. The introduction of mycoproducts and spent substrate blocks, as well as sawdust, increased the ground germination of Scots pine seeds by 10–50%, increased the safety of seedlings by 2–3 times, as well as their morphometric parameters and biomass. The use of biofertilizers increased the biogenicity and functional activity of the soil microbocenosis, especially noticeable in the variants with mycoproducts based on *T. versicolor* and substrate blocks of *P. egupdii*.

Key words: degraded soils, biofertilizer, mycoproduct, seedling germination and preservation, soil microbial biomass, basal respiration, number of ecological and trophic groups of microorganisms.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

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

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

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

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

Заглавие статьи должно быть информативным, включать ключевые слова.

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

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

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

При описании полевых опытов дозы удобрений, выраженные в кг/га N, P_2O_5 и K_2O, пишутся на строке (N90P60K60); для вегетационных опытов дозы питательных веществ (N, P, K), выраженные в мг/кг, пишутся в нижнем индексе ($N_{100}P_{75}K_{100}$).

При описании опытов с культурами растений должны быть указаны их сорта. При упоминании видов растений необходимо приводить их латинское название и авторов классификации; названия микроорганизмов и грибов следует писать только на латыни. Родовые и видовые латинские названия растений, грибов и микроорганизмов

надо печатать курсивом. Например, *Triticum aestivum* L.*, Sinorhizobium meliloti*.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$N_{аа}$ – аммоний азотнокислый (селитра аммиачная);

$N_{а}$ – аммоний сернокислый;

$N_{м}$ – мочевина (карбамид);

$N_{с}$ – селитра натриевая;

$N_{ск}$ – селитра калийная;

$N_{скц}$ – селитра кальциевая;

$N_{ц}$ – цианамид кальция;

$N_{ва}$ – водный аммиак;

$N_{ба}$ – безводный аммиак;

$P_{с}$ – суперфосфат простой;

$P_{сг}$ – суперфосфат простой гранулированный;

$P_{сд}$ – суперфосфат двойной;

$P_{п}$ – преципитат;

$P_{оф}$ – обесфторенный фосфат;

$P_{ф}$ – фосфоритная мука;

$P_{фш}$ – фосфатшлак;

$K_{х}$ – калий хлористый;

$K_{с}$ – калий сернокислый;

$K_{мг}$ – калимагнезия;

АФ – аммофос;

ДАФ – диаммофос;

ДАФК – диаммофоска;

АЗФК – азофоска;

КАФ – карбоаммофос;

КАФК – карбоаммофоска;

МФК – метафосфат калия;

НАФ – нитроаммофос;

НФ – нитрофос;

НФК – нитрофоска;

НАФК – нитроаммофоска;

ПФА – полифосфат аммония;

ФМ – фосфат мочевины;

ЖКУ – жидкое комплексное удобрение;

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

Другие сокращения необходимо расшифровать.

12. Формулы, на которые есть ссылки в тексте, должны быть пронумерованы. Пронумерованные формулы пишутся с красной строки, номер формулы ставится у правого края страницы в круглых скобках. Все ссылки в тексте на литературные источники даются на языке оригинала и нумеруются. Фамилии и названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский алфавит, пишутся в русской транскрипции. Номера ссылок в тексте должны идти строго по порядку упоминания и быть заключены в квадратные скобки.

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

Примеры оформления библиографического описания

Для монографий:

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

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

Для сборников:

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

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

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

Для трудов:

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

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

Для журналов:

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

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

Для авторефератов и диссертаций:

Глянько А.К. Реакция растительного организма на азотное питание и температуру среды (физиолого-экологические механизмы): Дис. ... д-ра биол. наук в форме научн. докл. Иркутск, 2000. 56 с.

Котлярова Т.И. Особенности усвоения азота корнями и листьями разных растений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИФР АН СССР, 1987. 22 с.

Для патентных документов:

Шаповалов А.А., Таци В.П., Пуцын Ю.Г. Соли 1-фенил-3-(1,2,4-триазол-4-ил) мочевины, обладающие свойством регуляторов роста растений: А. с. 1732651 (РФ) // Б.И. 1992. № 14. С. 25.

Шаповалов А.А., Пуцыкин Ю.Г., Егоров Б.Ф. Способ борьбы с сорными растениями, гербицидная композиция и синергист, повышающий активность гербицидов: Пат. 2130260, РФ // Б.И. 1998. № 5. С. 30.

15. Рукопись статьи направляется на рецензирование члену редколлегии журнала или ведущему специалисту в данной области исследований. Срок рецензирования статьи – 1 месяц. Положительная рецензия достаточна для приема к публикации. Если в рецензии имеются замечания, рукопись отправляется автору на переработку. Сроки переработки статьи – 4 месяца. Переработанную автором статью редакция направляет рецензенту на повторное рецензирование.

16. Статьи, оформленные без соблюдения изложенных правил, редакцией к рассмотрению не принимаются и возвращаются автору.

17. Рассылка оттисков опубликованных статей осуществляется в электронном виде на адрес электронной почты, указанный авторами для переписки.

18. Плата за публикацию рукописей не взимается.