

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 12, 2020

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Влияние кальцийсодержащего природного материала на состояние бурых лесных кислых почв и растений чая (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) в субтропиках России
Л. С. Малукова, Э. В. Притула, Н. В. Козлова, А. В. Великий 3
- Влияние пирогенеза на продуктивность фитоценоза, содержание и компонентный состав органического вещества аллювиально-болотной осушенной почвы
В. И. Титова, Н. В. Полякова 11
- Эффективность минеральных удобрений при различных способах обработки почвы
В. И. Турусов, В. М. Гармашов 19
-

Удобрения

- Эффективность использования азота в длительных и краткосрочных опытах агрохимслужбы и геосети Российской Федерации
В. А. Романенков, М. В. Беличенко, О. В. Рухович, Л. В. Никитина, О. И. Иванова 28
-

Пестициды

- Влияние различных мер борьбы с сорняками в севообороте на засоренность заключительного поля
Ю. Я. Спиридонов, Н. И. Будынков, И. В. Дудкин, Н. И. Стрижков, Н. Б. Суминова 38
- Результаты совместного применения гербицида команд и регуляторов роста при выращивании табака
Л. М. Соболева, Т. В. Плотникова, Е. М. Тютюнникова 45
-

Экотоксикология

- Подвижность и параметры миграции Zn в системе чернозем типичный—растения ячменя
В. С. Анисимов, Л. Н. Анисимова, Л. М. Фригидова, А. И. Санжаров, Ю. Н. Корнеев, Р. А. Фригидов, Д. В. Дикарев 50
- Тяжелые металлы в аллювиальных луговых почвах реки Упа в зоне индустриального воздействия
Л. В. Переломов, Д. Л. Пинский, И. В. Переломова, Ю. М. Атрощенко 64
- Особенности аккумуляции тяжелых металлов продуктивной частью сельскохозяйственных растений в различных агроэкологических условиях республики Мордовия
С. В. Пугаев 71
-

ОБЗОРЫ

- Влияние глобальных изменений климата на фитопатогены и развитие болезней растений
А. Н. Игнатов, Е. И. Кошкин, И. В. Андреева, Г. Г. Гусейнов, К. Г. Гусейнов, Ф. С.-У. Джалилов 81
-
-

Contents

No. 12, 2020

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Influence of Root Application of Calcium Containing Natural Substance on the State of Brown Forest Acid Soils and Tea Plants (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) in Russian Subtropics
L. S. Malyukova, Z. V. Pritula, N. V. Kozlova, A. V. Velikii 3
- Effects of Pyrogenesis on the Productivity of Phytocenosis, Content and Component Structure of Organic Substance Drained Alluvial-Marsh Silt-Peat Soil
V. I. Titova, N. V. Polyakova 11
- Efficiency of Mineral Fertilizers in Various Methods of Soil Treatment
V. I. Turusov, V. M. Garmashov 19
-

Fertilizers

- Nitrogen Use Efficiency in Long-Term and Short-Term Experiments in the Russian Federation
V. A. Romanenkov, M. V. Belichenko, O. V. Rukhovich, L. V. Nikitina, O. I. Ivanova 28
-

Pesticides

- Influence of Various Weed Control Measures in Crop Rotation on the Final Field's Clogging
Yu. Ya. Spiridonov, N. I. Budynkov, I. V. Dudkin, N. I. Strizhkov, N. B. Suminova 38
- Results of Combined Utilization of Herbicide Command and Growth Stimulators for Tobacco Growing
L. M. Soboleva, T. V. Plotnikova, E. M. Tutunnikova 45
-

Ecotoxicology

- Mobility and Migration Parameters of Zn in the Typical Chernozem-Barley System
V. S. Anisimov, L. N. Anisimova, L. M. Frigidula, I. A. Sanzharov, J. N. Korneev, R. A. Frigidov, D. V. Dikarev 50
- Heavy Metals in Alluvial Meadow Soils of the Upa River in the Zone of Industrial Exposure
L. V. Perelomov, D. L. Pinsky, I. V. Perelomova, Y. M. Atroschenko 64
- Peculiarities of Heavy Metals Accumulation in Productive Part of Crop Plants in Different Agro-Ecological Conditions of the Republic of Mordovia
S. V. Pugaev 71
-

REVIEWS

- Impact of Global Climate Change on Plant Pathogens Occurrence
A. N. Ignatov, E. I. Koshkin, I. V. Andreeva, G. G. Guseinov, K. G. Guseinov, F. S. -U. Dzhililov 81
-
-

ВЛИЯНИЕ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩЕГО ПРИРОДНОГО МАТЕРИАЛА НА СОСТОЯНИЕ БУРЫХ ЛЕСНЫХ КИСЛЫХ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ ЧАЯ (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) В СУБТРОПИКАХ РОССИИ

© 2020 г. Л. С. Малюкова^{1,*}, З. В. Притула¹, Н. В. Козлова¹, А. В. Великий¹

¹ Федеральный исследовательский центр “Субтропический научный центр Российской академии наук”
354002 Сочи, Краснодарский край, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, Россия

*E-mail: MalukovaLS@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2020 г.

После доработки 15.05.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

В условиях влажно-субтропической зоны России в полевом опыте изучали влияние применения кальцийсодержащего природного материала (глинисто-известковых отходов Адлерского карьера) на химический состав почв, урожайность и функциональное состояние растений чая. Установлено, что его применение в количестве 250 кг/га на фоне макроудобрений N240P70K90 способствовало менее выраженному подкислению бурых лесных кислых почв и снижению содержания в них обменных кальция и магния. На фоне применения этого материала отмечено улучшение калийного и фосфатного режима почв, а также активизация их биологической активности. Влияние изученного вещества на функциональное состояние растений проявлялось в увеличении активности каталазы в листьях, стабильности пигментного фонда и его функциональной активности, а также усилении синтеза танина и экстрактивных веществ. Эти процессы обеспечивали противодействие окислительному стрессу, повышая резистентность растений к неблагоприятным факторам среды, а также последующий выход из этого состояния, что способствовало усилению побегообразования и приросту урожайности в среднем на 20%.

Ключевые слова: культура чая, агрохимические свойства почв, кальцийсодержащий природный материал, биологическая активность почв, осмотический стресс, урожайность, физиология чая.

DOI: 10.31857/S0002188120120054

ВВЕДЕНИЕ

Чай является уникальной субтропической культурой, которую выращивают в зоне Черноморского побережья Краснодарского края более 100 лет [1]. При длительном возделывании чая на исходно кислых субтропических почвах (буроземах, желтоземах), как правило, развиваются процессы почвенной ацидизации [2, 3], приводящие к существенному снижению обменных форм кальция [2, 4], доступных растению, и кратковременному или долговременному дефициту этого элемента в периоды наиболее острой потребности, в частности, при засухе. Кальциевые удобрения в системе питания чая практически никогда не рассматривали, поскольку исходно было известно, что эта ацидофильная культура произрастает только на кислых почвах. Однако многолетние наблюдения авторов показали высокий биологический вынос и потребность чайного растения в этом элементе [5, 6], в последние годы также появились работы зарубежных коллег, в

которых показана эффективность применения некорневых подкормок кальцием [7, 8]. Учитывая также, что кальций является важнейшим многофункциональным элементом, который выполняет сигнальную стрессовую и осморегуляторную функции, индуцирует антиоксидантную систему и обеспечивает поддержание целостности мембран [7–10], необходимость его компенсации очевидна. Пополнить запас и улучшить обеспеченность растений этим элементом возможно путем внесения различных компонентов, в том числе кальцийсодержащих природных материалов, в частности известковых отходов горнодобывающей промышленности, применение которых в сельском хозяйстве курортной зоны имеет природоохранный и природо-восстановительный эффекты. Например, при камнедробильном производстве, поставляющим щебень для различных нужд, в результате отсева образуется мелкий материал, эти отвалы развеваются ветром и являются загрязнителями окружающей

среды. Эффективная утилизация этих отвальных субстратов, в частности, использование отходов в растениеводстве, требует предварительного изучения их химического состава и свойств, а также влияния на почву и растения.

В этой связи была поставлена цель — изучить в условиях полевого опыта влияния корневого применения кальцийсодержащего природного материала на химический состав почв и функциональное состояние растений чая в условиях влажно-субтропической зоны России.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили во влажно-субтропической зоне Черноморского побережья Краснодарского края, (г. Сочи, пос. Дагомыс, пос. Уч-Дере, 43.69° с.ш., 39.64° в.д.), для которой характерным является средняя многолетняя температура воздуха в пределах 12.8–16.5°C и годовое количество осадков 1313–2098 мм. Vegetационный период длится с апреля по октябрь, периодически в летний период отмечается засуха (<50 мм в месяц).

Почва опытного участка — бурая лесная кислая легкоглинистая на элюво-делювии аргиллитов согласно [11]. До наложения схемы опыта почва имела следующие агрохимические характеристики: pH_{KCl} 3.75 ± 0.14 , содержание подвижного алюминия — 6.43 ± 2.16 ммоль(экв)/100 г, содержание обменных кальция и магния — 8.40 ± 1.40 ммоль(экв)/100 г, содержание гумуса — $3.06 \pm 0.16\%$, содержание подвижного фосфора — 294 ± 37 и обменного калия — 273 ± 25 мг/кг. Полевой мелкоделяночный опыт был заложен на полновозрастной чайной плантации (сорт Колхида) (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) в 2003 г. Опыт включал контрольный вариант N240P70K90 и вариант с внесением кальцийсодержащего природного материала в почву в дозе 250 кг/га на фоне N240P70K90 (этот вариант в таблицах и на рисунках обозначен как Ca) в трехкратной повторности.

Кальцийсодержащий природный материал представляет собой глинисто-известковые отходы, образующиеся при дроблении известняков на мелкие фракции щебня (карьер, Адлерский р-н). По гранулометрическому составу материал на 3/4 состоит из фракций тоньше 0.25 мм. Это вещество характеризуется слабощелочной реакцией водной суспензии (pH_{H_2O} 8.20), содержит в обменной форме кальций (10.9 ммоль(экв)/100 г), в меньшем количестве магний — 2.2 ммоль(экв/100 г), а также азот, фосфор и калий. Площадь опытной делянки составляла 10 м². Формы основных удоб-

рений: N_{aa} , P_{cd} , K_x , НАФК. Базовые удобрения, а также кальцийсодержащий материал вносили ежегодно в поверхностный слой почвы с заделкой.

Для характеристики химического состава этого материала было также определено валовое содержание 49 химических элементов количественными методами — масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным анализами с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES) по аттестованной методике НСАМ № 499-АЭС/МС “Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами”. Используемая аппаратура: масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 (“Perkin Elmer”, США); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой спектрометр Optima-4300 DV (“PerkinElmer”, США). Для сравнительной характеристики изученного природного материала выполнен расчет кларков концентрации элементов (K_k) как отношения: $K_k = C_{\phi}/K$, где K — общая распространенность элементов для почв континентов (кларки почв) [12].

Исследованием комплекса показателей, характеризующих состояние почв и растений, был охвачен период 2011–2018 гг. Для оценки агрохимических свойств почв проводили отборы образцов в течение ряда лет (2010, 2016, 2018 гг.) в слое 0–20 см в весенний период (апрель), до внесения удобрений, который отражал последствие удобрений. Для оценки диапазона варьирования агрохимических и биологических свойств почв в течение вегетационного периода в 2015–2016 гг. были отобраны почвенные образцы в слое 0–20 см в апреле, июне, августе и сентябре. Анализ почв проводили по общепринятым методикам [13]: pH_{KCl} — потенциометрическим методом (ионметр рН-121), алюминий — по Соколову, азот легкогидролизуемый — по Тюрину–Кононовой, используя колориметрический метод с реактивом Несслера, прибор УСФ-01; фосфор подвижный — по Ониани с колориметрическим окончанием по Дениже (прибор УСФ 01); калий подвижный — по Ониани (прибор КВАНТ-АФА); содержание обменных форм Ca^{2+} и Mg^{2+} — трилометрическим методом. Определение интенсивности “дыхания” почвы (мг CO_2 /кг почвы) проводили методом абсорбции с титрометрическим окончанием в трехкратной повторности. Навеску почвы 100 г, доведенной водой до 60% ПВ помещали в чашку Петри и инкубировали в герметично закрытых

полиэтиленовых пакетах в течение 24 ч с поглощающим CO_2 раствором – 0.1 н. NaOH. Остаток щелочи титровали 0.1 н. HCl. Определение активности ферментов проводили в свежих образцах почв методами в модификации Галстяна [14]: каталазы – газометрическим методом (по количеству выделившегося молекулярного кислорода), уреазы – колориметрическим методом учета аммония с реактивом Несслера.

Содержание в растительных образцах токсичных элементов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) с использованием прибора iCAP-6000 (Thermo Scientific, США). Функциональное состояние растений оценивали по комплексу физиолого-биохимических показателей. Содержание танина определяли по методу Левенталея с пересчетным коэффициентом 5.82 по Джемухадзе, экстрактивных веществ – весовым методом по Воронцову [15]. Содержание фотосинтетических пигментов определяли в экстракте зеленых листьев (зрелый лист 5–6-месячного возраста) в 100%-ном ацетоне методом Шлыка [16]. Оценку функционального состояния фотосинтетического аппарата растений чая проводили по параметрам медленной индукции флуоресценции хлорофилла на приборе LPT-3C, согласно его инструкции, разработанной Будаговской и Будаговским [17]. Эффективность фотохимических реакций была оценена по показателю относительного тушения флуоресценции – индексу жизнеспособности (соотношение максимума флуоресценции к стационарной флуоресценции). Определение активности каталазы в листьях проводили газометрическим методом по методике Гунара [18].

В течение исследованного периода (2011–2018 гг.) проводили учет урожайности чая 5–8 раз за сезон в зависимости от метеорологических условий. Учет общего количества побегов, а также соотношение разнокачественных флешей и их массу определяли на выделенных учетных делянках площадью 0.25 м² в 2-х точках на каждой полевой повторности опыта.

Обработка данных проведена методами описательной статистики в программе Microsoft Excel (при $p \leq 0.05$). В таблицах и на рисунках представлены средние \pm стандартное отклонение, а также диапазоны варьирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для комплексной характеристики химического состава исследованного природного материала, в том числе содержания токсичных элемен-

Таблица 1. Кларки концентраций токсичных и редких химических элементов в кальцийсодержащем материале

Приоритетные элементы	Sr (2.73), Cd (2.38), I (1.47), Mn (0.61), Ni (0.42), Mg (0.37), Sn (0.36), Ta (0.24), Pb (0.22), Zn (0.21), Ho (0.20), Li, Co, Er (0.18), Gd (0.17), Tm (0.15), Tb (0.14), Lu, Yb, Au, Sc (0.13), Eu, Sm, Dy (0.12), Yb (0.11)
Дефицитные элементы	Pr, Nd (0.09), K (0.07), Cu, Sb, Cs, Hf (0.08), Cr, Nb, Bi, Th, U (0.06), Al, Fe, Mo, Be, V, Rb (0.05), Ti (0.04), Na, Ga, Zr Ba (0.03)

тов, был рассчитан K_k 49 элементов. Исследованный материал содержал в среднем 40–50% кальция. Для 45 элементов K_k был <1 (табл. 1). Содержание иттрия в 1.5 раза превышало кларковое (4.7 мг/кг), что характерно для прибрежных карбонатных пород. Два других сопутствующих химических элемента Sr (600 мг/кг) и Cd (0.38 мг/кг), содержание которых было значительно больше кларка, не превышали установленные для них валовые ПДК почвы: 600 и 2 мг/кг соответственно.

Применение на бурых лесных кислых почвах чайных плантаций кальцийсодержащего материала было направлено на восполнение запасов кальция при существенном его выщелачивании в кислых условиях до критических показателей – 1–2 ммоль(экв)/100 г почвы [5, 6]. Исследование показало, что в целом на фоне применения этого материала в течение более 10 лет отмечали менее выраженный сдвиг pH в сторону кислого интервала в сравнении с контролем. Также снижалось содержание подвижного алюминия при соответствующем увеличении содержания обменных кальция и магния (табл. 2). На этом фоне закономерно прослеживалась активизация дыхательной и ферментативной активности почв (табл. 3).

В табл. 3 отражен диапазон варьирования почвенных параметров в течение вегетации, который демонстрирует, что пополнение в почве запасов обменного кальция сопровождалось увеличением содержания обменного калия за счет вытеснения его из почвенно-поглощающего комплекса, что улучшало питательный режим растений этим элементом, особенно необходимым в условиях недостаточного водообеспечения.

В отдельные периоды вегетации наблюдали снижение содержания в почвах подвижных фосфатов, которые в связи с их высоким химическим сродством к иону Ca^+ образуют слаборастворимые соединения [19]. При этом в энергетическом отношении фосфор этих кальцийсодержащих

Таблица 2. Влияние кальцийсодержащего природного вещества на агрохимические свойства почв (апрель, до внесения удобрений)

Вариант	рН _{KCl}	Al ³⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	N _{лг}	P ₂ O ₅	K ₂ O
		ммоль(экв)/100 г				
2010 г.						
Контроль	3.26 ± 0.15	12.2 ± 1.3	3.1 ± 0.7	201 ± 28	667 ± 295	437 ± 37
Ca	3.50 ± 0.12	9.8 ± 0.9	4.8 ± 1.3	151 ± 17	488 ± 120	464 ± 55
2016 г.						
Контроль	3.31 ± 0.02	10.3 ± 0.9	3.3 ± 0.9	96 ± 13	428 ± 30	250 ± 40
Ca	3.50 ± 0.05	10.0 ± 1.6	3.5 ± 0.9	108 ± 3	347 ± 54	240 ± 12
2018 г.						
Контроль	3.38 ± 0.11	12.8 ± 0.8	2.6 ± 0.4	—	504 ± 30	360 ± 14
Ca	3.50 ± 0.05	10.6 ± 0.6	4.2 ± 1.0	—	437 ± 54	450 ± 52

компонентов жидких фаз почв (в отличие от алюмо- и железозосфатов) является более доступной формой для растений, что обусловлено высоким сродством лигандов корневых выделений к кальцию [19].

В период 2011–2012 гг. урожай зеленого чайного листа на фоне применения кальцийсодержащего материала был несколько меньше или соизмерим с урожаем контрольного варианта (рис. 1).

В последующий период при ежегодном использовании этого вещества отмечали стабильную прибавку урожайности в среднем ≈20%. При этом прирост урожайности в варианте с кальцием был обусловлен главным образом усилением побегообразовательной способности растений (табл. 4). Масса флешей и структура урожая (соотношение разновозрастных типов побега) варьировали незначительно и были соизмеримы.

Таблица 3. Диапазон варьирования агрохимических и биологических свойств бурых лесных почв в течение вегетации культуры чая (2015–2016 гг.)

Показатель	Варианты	
	Контроль	Ca
рН _{KCl}	2.95–3.28	3.23–3.44
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль(экв)/100 г	2.9–4.5	3.9–5.3
N _{лг} , мг/кг	55–270	110–450
P ₂ O ₅ , мг/кг	780–1100	560–893
K ₂ O, мг/кг	300–450	400–660
“Дыхание” почв, мг CO ₂ /кг	35–90	100–130
Каталаза, мл O ₂ /г почвы/мин	1.0–3.9	6.2–8.9
Уреаза, мг NH ₃ /10 г почвы	2.5–3.0	10.4–12.2

В целом в благоприятные по гидротермическим условиям годы урожайность чая сорта Колхида варьировала в диапазоне 4.6–11.7 т/га (рис. 1) и была сопоставима с потенциально возможной для данной климатической зоны [6, 20]. Урожайность чая формировалась достаточно равномерно, главным образом в период май–начало августа (табл. 5), с некоторым преимуществом майских сборов, что обусловлено рядом экологических факторов, а также биологической особенностью растений. Потеря урожайности до 15–30% от валовой имела место при неблагоприятном весеннем периоде (возвратных холодах), а также до 50–60% – при наступлении летних засушливых периодов (июль–август), что подтверждало многолетние наблюдения за динамикой формирования урожая чая в условиях влажно-субтропической зоны России [6, 20].

Применение кальцийсодержащего материала существенно не повлияло на содержание в чайном сырье токсичных элементов, за исключением свинца, содержание которого было больше, но не выходило за рамки ПДК (табл. 6).

Изученный в данном исследовании комплекс физиолого-биохимических показателей раскрывает некоторые механизмы, предположительно опосредованные кальцием. Одним из наиболее информативных показателей выносливости растений к осмотическому стрессу наряду с другими ферментами (пероксидазой, супероксиддисмутазой и др.) рассматривается каталаза – основной фермент, ликвидирующий избыточные количества пероксида водорода, относящегося к индукторам активных форм кислорода [9, 21, 22]. Активность антиоксидантного фермента каталазы в зрелых листьях чайного растения в стрессовых условиях находилась на достаточно высоком

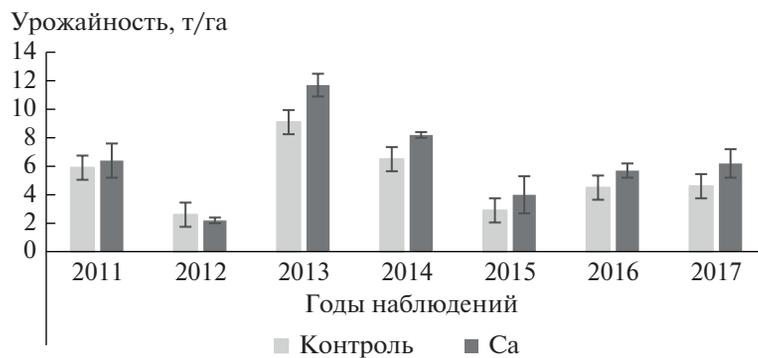


Рис. 1. Многолетняя динамика урожайности чая сорта Колхида (т/га), 2011, 2013, 2014, 2018 – годы с благоприятными метеоусловиями; 2012, 2015, 2017 – годы с неблагоприятными метеоусловиями.

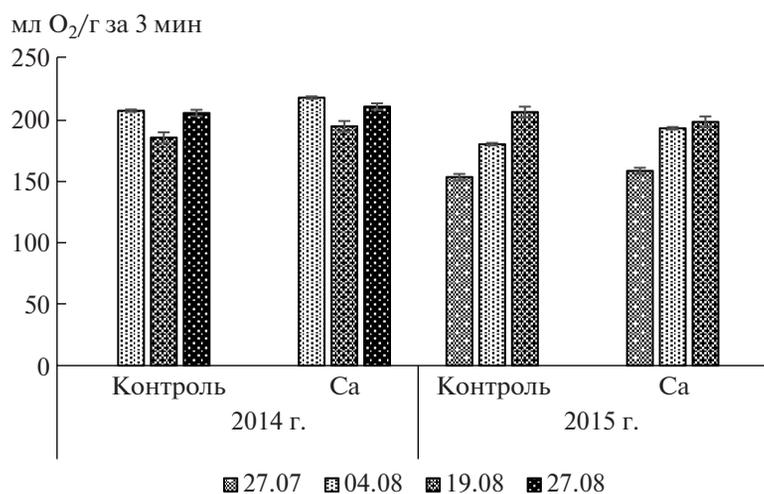


Рис. 2. Каталазная активность (мл O₂/г/3 мин) зрелых листьев чайного растения в напряженный по влагообеспеченности период.

уровне (рис. 2), что, согласно литературным данным, является первичным сигналом, свидетельствующим о возникновении окислительного напряжения [22].

При этом активность каталазы в варианте с кальцийсодержащим материалом достоверно превышала контроль, что указывало на более раннюю индук-

цию антиоксидантной системы растения и снижение за счет этого окислительных повреждений растений. Предположено, что при стрессе, кальциевый сигнал передается по пути, компонентами которого являются активные формы кислорода, что влияет на процессы, регулирующие ферменты антиоксидантной защиты [8, 23].

Таблица 4. Суммарное количество (шт./м²) и масса (г) разновозрастных типов побегов за вегетацию

Вариант	Средние показатели за 2013–2014 гг.				Общее количество побегов
	глухих	2-листных	3-листных	4-листных	
Контроль	$\frac{202 \pm 31}{0.63 \pm 0.07}$	$\frac{418 \pm 25}{0.57 \pm 0.05}$	$\frac{375 \pm 119}{0.98 \pm 0.11}$	$\frac{25 \pm 15}{1.66 \pm 0.13}$	1300 ± 100
Са	$\frac{271 \pm 42}{0.69 \pm 0.12}$	$\frac{446 \pm 115}{0.58 \pm 0.04}$	$\frac{467 \pm 83}{0.95 \pm 0.07}$	$\frac{34 \pm 11}{1.59 \pm 0.21}$	1550 ± 100

Примечание. Над чертой – суммарное количество побегов, под чертой – масса побега.

Таблица 5. Динамика формирования урожая чая в течение вегетации, т/га

Месяцы	2011*		2013*		2015**		2017**		2018*	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Май	2.3	2.3	2.6	3.1	0.5	0.8	1.9	2.7	1.8	2.3
Июнь	0.5	0.9	2.2	2.6	1.0	1.6	0.7	0.8	0.4	0.6
Июль	1.8	1.9	1.9	2.7	0.4	0.7	1.4	1.7	1.3	1.6
Август	0.7	1.0	2.0	2.6	1.0	0.9	0.5	0.5	1.0	1.5
Сентябрь	0.6	0.4	0.5	0.7	0	0	0	0	0.1	0.2
Итого	5.9	6.5	9.2	11.7	2.9	4.0	4.5	5.7	4.6	6.2

Примечание. В графе 1 – контроль, 2 – применение кальцийсодержащего материала.

*Годы с благоприятными условиями.

**Годы с неблагоприятными условиями.

Одним из важных механизмов преодоления стресса рассматривается индукция образования и накопления различных вторичных метаболитов в растениях, в частности флавоноидов, антоцианов, пигментов и других веществ, которые, обладая антиоксидантными свойствами, снижают осмотический и окислительный стрессы [23, 24]. Для чайного растения эта тенденция также характерна, поскольку отмечено увеличение содержа-

ния танина и экстрактивных веществ в стрессовый летний период [25], а также в годы с низкой влагообеспеченностью (табл. 7).

На фоне применения кальцийсодержащего природного материала происходило более интенсивное образование и накопление органических компонентов, определяющих качество чая и его антиоксидантную активность (табл. 7, 8).

Одним из механизмов устойчивости растений к стрессам рассматривается сохранение стабильности фотосинтетического аппарата и за счет этого более эффективная его работа в постстрессовый период. В стрессовый летний период была выявлена тенденция к увеличению функциональной активности по показателю индекса жизнеспособности, который был больше в варианте с кальцием (рис. 3).

В ранневесенний период более высоким содержанием фотосинтетических пигментов характеризовались листья растений в варианте с применением кальцийсодержащего вещества по сравнению с контролем, что являлось, по-видимому, следствием сохранения целостности пигментного фонда в стрессовых условиях и его дальнейшего возобновления (рис. 4).

Таблица 6. Концентрация токсичных элементов (мг/кг абсолютно-сухого вещества) в 3-листной флеша чая сорта Колхида (средние данные за 2013 и 2017 гг.)

Вариант	Элемент			
	Cu	Cd	Pb	Sr
Контроль	9.12 ± 0.73	0.015 ± 0.005	4.29 ± 1.15	4.82 ± 0.53
Ca	9.72 ± 0.16	0.015 ± 0.005	6.13 ± 2.45	4.23 ± 0.56
ПДК	100	1.0	10.0	–

Таблица 7. Содержание органических веществ в 3-листной флеша чая (июль) в контрастные по метеорологическим условиям годы, %

Вариант	Экстрактивные вещества		Танин		Кофеин	
	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.
Контроль	44.3 ± 0.6	42.8 ± 1.0	30.5 ± 1.2	31.1 ± 0.4	2.95 ± 0.28	3.15 ± 0.21
Ca	46.1 ± 0.8	42.9 ± 0.3	34.2 ± 1.9	32.4 ± 0.3	3.50 ± 0.12	3.39 ± 0.93

Примечание. 2012 г. – засушливый, 2013 г. – оптимальный по влагообеспеченности.

Таблица 8. Содержание органических компонентов в 3-листной флеша чая, % (среднее за 2011–2013 гг.)

Вариант	Экстрактивные вещества		Танин		Кофеин
	май	июль	май	июль	июль
Контроль	41.3 ± 0.9	43.1 ± 1.0	25.3 ± 1.9	31.3 ± 1.0	3.05
Ca	41.9 ± 0.8	43.8 ± 2.0	27.2 ± 2.1	32.8 ± 1.3	3.44

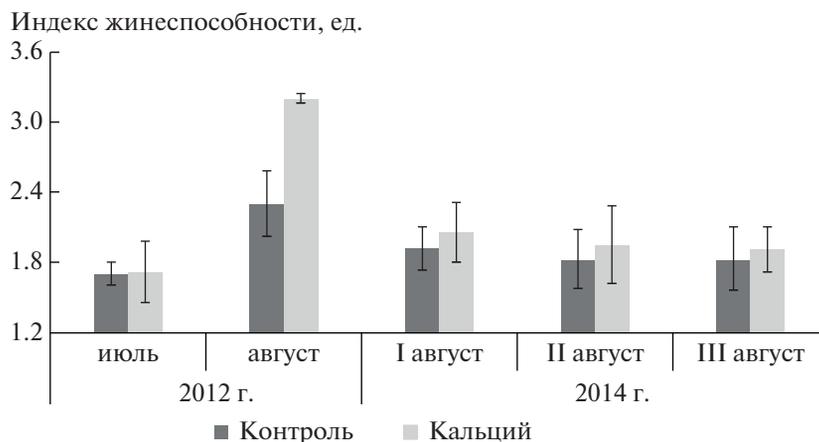


Рис. 3. Влияние кальцийсодержащего материала на индекс жизнеспособности зрелого листа чайного растения в летний стрессовый период.

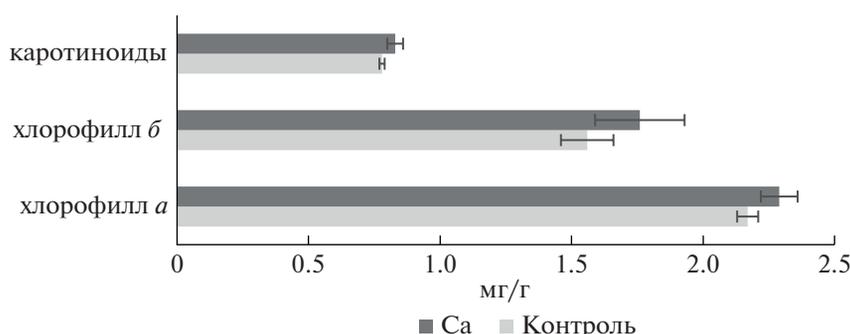


Рис. 4. Содержание фотосинтетических пигментов в зрелом листе чайного растения в ранневесенний период.

ВЫВОДЫ

1. Применение кальцийсодержащего природного материала при возделывании чая на бурых лесных кислых почвах сдерживало темпы acidизации и улучшало их питательный режим в отношении кальция, магния, фосфора, калия, а также активизировало их биологическую активность.

2. На фоне этих изменений отмечено повышение устойчивости растений чая к совокупному воздействию стресс-факторов за счет поддержания ферментативной активности листьев на более высоком уровне, индукции синтеза вторичных метаболитов, адаптивной перестройке пигментного фонда.

3. Улучшение функционального состояния растений при внесении кальцийсодержащего материала обеспечивало существенный прирост урожайности чая в среднем на 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рындин А.В., Туов М.Т., Малюкова Л.С. Становление, развитие, современное состояние и научное

обеспечение отрасли чаеводства в России // Субтроп. и декорат. сад-во. 2019. Вып. 69. С. 9–15. <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2019-69-9-15>

2. Малюкова Л.С., Рындин А.В., Козлова Н.В. Особенности агрогенной трансформации бурых лесных кислых почв чайных плантаций // Вестн. РАСХН. 2008. № 4. С. 26–27.

3. Козлова Н.В., Малюкова Л.С. Влияние длительного применения минеральных удобрений на кислотно-основное состояние бурых лесных кислых почв чайных плантаций субтропиков России // Агрохимия. 2007. № 9. С. 3–9.

4. Козлова Н.В., Керимзаде В.В. Скорость агрогенной acidизации бурых лесных почв чайных плантаций в условиях влажных субтропиков России // Плодоводство и ягодоводство России. 2017. № 51. С. 259–267.

5. Малюкова Л.С., Козлова Н.В. Методические рекомендации по комплексной почвенно-растительной диагностике минерального питания чая. Сочи: ВНИИЦ и СК РАСХН, 2010. 37 с.

6. Малюкова Л.С. Оптимизация плодородия бурых лесных почв и применения минеральных удобрений при выращивании чая в условиях Черноморского побережья России: Дис. ... д-ра биол. наук. Сочи, 2013. 343 с.

7. Upadhyaya H., Dutta B.K., Sahoo L., Panda S.K. Comparative effect of Ca, K, Mn and B on post-drought stress recovery in tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) // Amer. J. Plant Sci. 2012. № 3. P. 443–460.
8. Upadhyaya H., Panda S.K., Dutta B.K. CaCl₂ improves post-drought recovery potential in *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze // Plant Cell Rep. 2011. № 30. P. 495–450.
9. Bowler C., Fluhr B. The role of calcium and activated oxygen as signals for controlling cross-tolerance // Trend Plant Sci. 2000. № 5. P. 241–243.
10. Медведев С.С. Кальциевая сигнальная система растений // Физиология растений. 2005. Т. 52(2). С. 282–305.
11. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
12. Ярошевский А.А. Проблемы современной геохимии. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2004. 194 с.
13. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
14. Галстян А.Ш. Ферментативная активность почв Армении // Тр. НИИ почвоведения и агрохимии. Ереван: Изд-во “Айастан”, 1974. Вып. 8. 275 с.
15. Воронцов В.Е. Биохимия чая. М.: Пищепромиздат, 1946. 279 с.
16. Шлык А.А. Определение хлорофилла и каротиноидов зеленых листьев // Биологические методы в физиологии растений. М., 1971. С. 154–170.
17. Будаговская О.Н. Новые оптические методы и приборы количественной оценки адаптивного потенциала садовых растений // Плодоводство и ягодоводство России (ВСТИСП). 2001. Т. 28. С. 74–79.
18. Гунар И.И. Практикум по физиологии растений. М.: Колос, 1972. С. 100–102.
19. Кудярова А.Ю. Фосфатогенная трансформация почв. М.: Наука, 1995. 285 с.
20. Туов М.Т. Научные основы повышения качества и продуктивности чайных плантаций России: Дис. ... д-ра с.-х. наук. Сочи: ВНИИЦиСК РАСХН, 1997. 417 с.
21. Мирошниченко О.С. Биогенез, физиологическая роль и свойства каталазы // Биополимеры и клетка. 1992. № 8 (6). С. 3–25.
22. Ли М., Ван Г., Лин Ц. Кальций способствует адаптации культивируемых клеток солодки к водному стрессу, индуцированному полиэтиленгликолем // Физиология растений. 2004. Т. 51 (4). С. 575–581.
23. Akola R., Ravishankar G.A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants // Plant Signal. Behav. 2011. № 6:11. P. 1720–1731. <https://doi.org/10.4161/psb.6.11.17613>
24. Hernaandez I., Alegre L., Munne-Bosch S. Enhanced oxidation of flavan-3-ols and proanthocyanidin accumulation in water-stressed tea plants // Phytochemistry. 2006. № 67. P. 1120–1126.
25. Пritула З.В., Малукова Л.С., Козлова Н.В. Особенности влияния комплекса экологических факторов на биохимические показатели качества чая сорта Колхида в условиях субтропиков России // Субтропическое и южное садоводство России. Науч. тр. ВНИИЦиСК РАСХН. Вып. 42. Т. 2. Сочи, 2009. С. 86–101.

Influence of Root Application of Calcium Containing Natural Substance on the State of Brown Forest Acid Soils and Tea Plants (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) in Russian Subtropics

L. S. Malyukova^{a,#}, Z. V. Pritula^a, N. V. Kozlova^a, and A. V. Velikii^a

^a Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences
ul. Jana Fabritziusa 2/28, Krasnodar region, Sochi 354002, Russia

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

In the conditions of the humid subtropical zone of Russia, the field experiment the effect of root application of calcium-containing natural substances on the chemical composition of soils, yield and functional state of tea plants are studied. It was established that its application from the calculation of Ca100 against the background of macro-fertilizers (N240P70K90) contributed to a less pronounced acidification of brown forest acidic soils and the maintenance of metabolic calcium and magnesium in them at a higher level compared to the control. Against the background of the use of this material, an improvement in the potassium and phosphate regime of soils, as well as the activation of their biological activity, was noted. The influence of the studied substance on the functional state of plants was manifested in an increase in the activity of catalase in the leaves, an increase in the synthesis of tannin and extractive substances, an increase in the stability of the pigment fund and an increase in its functional activity. These processes provided resistance to oxidative stress, increasing the resistance of plants to adverse environmental factors, as well as the subsequent exit from this state, which contributed to increased shoot formation and yield growth by an average of 20%.

Key words: tea, agrochemical properties of soils, biological activity of soils, osmotic stress, calcium-containing natural substance, yield, tea physiology.

УДК 631.445.124:631.482.1:631.472:631.423.4:632.111.9

ВЛИЯНИЕ ПИРОГЕНЕЗА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ФИТОЦЕНОЗА, СОДЕРЖАНИЕ И КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА АЛЛЮВИАЛЬНО-БОЛОТНОЙ ОСУШЕННОЙ ПОЧВЫ

© 2020 г. В. И. Титова^{1,*}, Н. В. Полякова¹

¹ Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия
603107 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 97, Россия

*E-mail: titovavi@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.

После доработки 27.07.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

Приведены результаты изучения состояния осушенных аллювиальных торфяных почв правобережья Нижегородской обл., на площади в 63 га, подвергшихся воздействию открытого огня в 2010 г. (разр. 2), 2013–2014 (разр. 3) и в 2017 г. (разр. 4). Фоновая почва классифицируется как осушенная аллювиально-болотная иловато-торфяная (разр. 1). Полевое обследование проведено в 2018 г. с отбором почвенных образцов. В образцах почвы определены pH_{KCl} , обеспеченность подвижными соединениями фосфора и калия, содержание и компонентный состав органического вещества. Продуктивность фитоценоза оценена на пробных площадках в местах закладки почвенных разрезов. Установлено, что пирогенез привел к утрате 40–50% торфяной толщи, “проседанию” дневной поверхности, застою влаги в замкнутых понижениях и заболачиванию территории. Содержание подвижных соединений фосфора и калия в почвах после пожара относительно фона повысилось на 50%, оставаясь при этом очень низким. Общее количество углерода в торфяных горизонтах пирогенных почв в сравнении с почвой фона сократилось в 3 раза (с 40–49 до 14–15%), а содержание легкоразлагаемого органического вещества снизилось, более чем в 4 раза (с 1.94 до 0.47%). Содержание углерода гумуса снизилось более чем на 80 отн. %, меняясь в пределах 2.3–3.8 против 17.2–19.8% в фоновой почве. Продуктивность наземного фитоценоза почв, подвергшихся пирогенезу, сократилась, составляя не более 50% продуктивности таких почв естественного сложения, оцененной в 1.06 т сена/га.

Ключевые слова: осушенная аллювиально-болотная иловато-торфяная почва, пирогенез, компонентный состав органического вещества, продуктивность фитоценоза.

DOI: 10.31857/S000218812012011X

ВВЕДЕНИЕ

Торфяники и торфяные почвы – часть почвенного покрова, имеющая очень большое значение не только в сельскохозяйственном производстве, но и для биосферы в целом. Одна из основных причин этого – существенные запасы углерода в таких почвах, которые в значительной степени определяют их плодородие, но при осушении и пожарах могут оказать негативное влияние на климат нашей планеты за счет выбросов CO_2 в составе парниковых газов [1]. Вместе с тем систематические пожары осушенных аллювиальных торфяных почв, в отличие от пожаров на болотах с естественным режимом, часто сопровождаются полным выгоранием торфа до минеральной породы. В результате на дневную поверхность выходит подстилаящая торф толща сильно оглеенной

породы, а почвы замещаются преимущественно минеральными пирогенными образованиями, отличающимися полной или частичной потерей плодородия, кардинальной сменой состава фитоценоза [2] и снижением его продуктивности [3]. Возникающие при этом минеральные и торфяные вторичные деградированные продукты исходно полнопрофильных торфяных почв принято называть пирогенными образованиями. При глубинном проявлении пирогенной деградации, как правило, имеет место практически полная потеря плодородия почвы.

В целом изучению состояния почв, подвергшихся воздействию пожаров, посвящено относительно небольшое количество публикаций. При этом отмечено их влияние на характер аккумуляции пирогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в почвах как депони-

рующих средах ландшафта [4–6], а также проанализированы основные тенденции к изменению агрономических свойств торфяных почв при пожарах [7–11]. Подчеркнуто, что пирогенные образования приобретают специфические химические свойства. Например, в золе по сравнению с исходным торфом содержание подвижных форм практически всех макро- (Ca, Mg, K, Mn, P и др.) и микроэлементов, а также тяжелых металлов (Pb, Cd, Si и др.) может возрастать [12–14]. Содержание органического вещества при этом снижается [15, 16].

В результате естественного элювиирования, а также развития эрозионных процессов, химические элементы из пирогенных образований интенсивно вымываются. Данный процесс в дальнейшем приводит к резкому обеднению верхнего слоя питательными веществами. Установлено, например, что только за один год, следующий за пожаром, содержание Ca, Mg, K, Mn и других элементов в золе снижается на 30–40% [3]. При таких потерях уже через 2–3 года нехватка калия для растений становится критической.

Величины pH поверхностного слоя непосредственно после пожара являются сильнощелочными – 10.5–11.6 [7], что обусловлено высокой концентрацией в золе углекислого калия (поташа). Однако после паводка и промывки атмосферными осадками pH золы снижается до 8.0–8.5. Эти величины связаны с повышенным содержанием в золе углекислых солей щелочноземельных металлов. В отличие от исходных торфяных почв пирогенные образования характеризуются ухудшением физических свойств [17], причем величины их набухания уменьшаются почти в 4 раза. В целом гидрофизические свойства пирогенных образований приближаются к свойствам минеральных субстратов.

Цель работы – оценка состояния аллювиально-болотной иловато-торфяной осушенной почвы, подвергшейся пирогенезу, на основе показателей продуктивности фитоценоза, содержания элементов питания и компонентного состава ее органического вещества.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования расположена в лесостепной зоне Нижегородской обл., в Правобережном агропочвенном районе, где доминируют светло-серые лесные легкосуглинистые и среднесуглинистые почвы. Почвообразующими породами в этой зоне почти повсюду являются лессовидные суглинки. В условиях избыточного увлажнения в результате поемного процесса, при участии

влаголюбивой растительности и ограниченном доступе воздуха в этой зоне также формируются аллювиальные болотные иловато-торфяные почвы, характеризующиеся частичным разложением отмирающих растительных остатков и накоплением торфа [18]. Параллельно происходит оглеение минеральных горизонтов с образованием в итоге 2-х слоев – торфяного (Т) и глеевого (G) [19]. Одним из основных условий их использования в качестве сельскохозяйственных угодий является проведение осушительных мелиоративных работ, что позволяет оптимизировать водно-воздушный режим, физические и агрохимические свойства таких почв при нивелировании избыточного увлажнения.

Данное исследование проводили в пойме р. Кудьма, на территории, осушенной в 60-е годы XX столетия системой дренажных каналов. Длительное время осушенные участки поймы использовали в кормовых севооборотах и в качестве сенокоса, а на рубеже XX–XXI вв. из-за сложных организационно-экономических условий активная сельскохозяйственная деятельность здесь была приостановлена, участок начал зарастать сорняками и мелколесьем и практически полностью перешел в категорию “залежь”. При этом водоотводные каналы на участке частично сохранили свое назначение в качестве осушительной мелиоративной системы, что явилось одной из причин того, что в первую очередь воздействию пожаров и возгоранию подверглись именно осушенные участки поймы, а не заболоченные неосушенные. Наиболее интенсивные и продолжительные пожары на данной территории отмечены в 2010 г., существенные локальные возгорания на отдельных участках отмечали в 2013–2014 гг., что продолжается по настоящее время. По данным визуального осмотра участка, порядка 80–90% его территории (площадь участка 63 га) имеют следы пирогенного воздействия на почву.

Учитывая, что при торфяных пожарах их негативное воздействие распространяется по глубине почвенного профиля, на участке было заложено несколько разрезов с полным описанием мощности отдельных горизонтов, их физического состояния, типичных признаков и особенностей материала, из верхних горизонтов которых были отобраны образцы для проведения агрохимических анализов.

Для сравнения почвенных разрезов и установления типа исходной фоновой почвы, а также определения мощности генетических горизонтов, включая определение мощности торфяного горизонта, был заложен фоновый разрез (разр. № 1). Данный участок возгоранию не подвергался,

Таблица 1. Описание профилей почвенных разрезов

Горизонт	Глубина, см	Описание генетических горизонтов
Разр. № 1 (фон)		
Ад (О)	0–8	Дернина, уплотненная, темно-бурого цвета, сильно пронизана корнями растений
T1	8–52	Торфяной горизонт темно-серого цвета с включениями крупных корней растений, обогащен илом
T2	52–70	Торфяной горизонт темного цвета, более плотный, без включения крупных корней, с примесью минерального ила
Аллювиально-болотная иловато-торфяная осушенная почва		
Разр. № 2		
Ад (О)	0–6	Дернина, очень рыхлая, ярко бурого цвета, пронизана корнями растений
П _{T1} *	6–25	Пирогенный горизонт, представляет собой минеральную глинистую пластичную массу с полностью выгоревшим торфом, бурого цвета; слабо пронизан корнями, уплотнен
П _{T2} **	25–48	Торфяной горизонт темно-серого цвета, обогащен илом
Пирогенная аллювиально-болотная иловато-торфяная осушенная почва		
Разр. № 3		
Ад (О)	0–3	Дернина, очень рыхлая, бурого цвета, пронизана корнями растений
П _{T1} *	3–24	Пирогенный горизонт, представляет собой минеральную глинистую пластичную массу с полностью выгоревшим торфом, бурого цвета; слабо пронизан корнями, уплотнен
Bg	21–41	Переходный оглееный горизонт темно-серого цвета со стальным оттенком и ржавыми пятнами; плотный
G	41–78	Глеевый горизонт грязно-стального цвета с ржаво-охристыми пятнами; влажный, плотный
Пирогенная аллювиально-болотная иловато-торфяная осушенная почва		
Разр. № 4		
Ад (О)	0–6	Дернина, очень рыхлая, ярко бурого цвета, пронизана корнями растений
П _{T1} *	6–23	Пирогенный горизонт, представляет собой минеральную глинистую пластичную массу с полностью выгоревшим торфом, бурого цвета; слабо пронизан корнями, уплотнен
Bg	23–44	Переходный оглееный горизонт темно-серого цвета со стальным оттенком и ржавыми пятнами; плотный
G	44–70	Глеевый горизонт грязно-стального цвета, плотный

*Пирогенный минерально-глинистый горизонт.

**Пирогенный торфяной горизонт.

представлен залежью 10–12 лет с естественной разнотравно-злаковой растительностью.

На почве, подверженной пирогенезу, судя по внешним признакам, с разной степенью его проявления, заложено 3 почвенных разреза.

Разрез № 2 заложен на территории с понижением дневной поверхности на 1.0–1.5 метра, без признаков заболачивания. Проседание поверхности вызвано пожарами, имевшими место в период не позже 2010 г. Травостой изрежен, представлен в основном крупными злаками с преобладанием вейника.

Разрез № 3 заложен на территории с выраженными признаками заболачивания, вызванными, вероятнее всего, снижением уровня дневной поверхности из-за пожаров 2013–2014 гг. и сгорания торфа до глубины 70–80 см. Глеевый горизонт здесь обильно насыщен грунтовыми водами. Как отмечено в работе [20], горизонты почвы, подвергшиеся пирогенезу, обладают водоотталкивающими свойствами, что приводит к застою атмосферных осадков и способствует заболачиванию территории. Присутствует болотная растительность. В связи с выгоранием торфа на территории

Таблица 2. Продуктивность фитоценоза (надземная масса) на пробных площадках в местах закладки почвенных разрезов (2018 г.), т/га

Участок	Зеленая фитомасса		Воздушно-сухое вещество	
	т/га	± к фону	т/га	± к фону
Разр. № 1 (фон)	4.26	—	1.06	—
Участки, подверженные пирогенезу				
Разр. № 2	2.18	–2.08/49	0.52	–0.54/51
Разр. № 3	1.02	–3.24/76	0.24	–0.82/77
Разр. № 4	0.54	–3.72/87	0.13	–0.93/88
Средние пирогенных почв	1.25	–3.01/71	0.30	–0.76/72
<i>HCP</i> ₀₅	0.41		0.09	

Примечание. Над чертой – т/га, под чертой – в % фону.

наблюдается волнообразное прогибание поверхности. В составе растительности наряду с вейником присутствует осока.

Разрез № 4 заложен практически на месте пожаров последнего года (2017 г.), здесь от торфяного горизонта осталось примерно 5–7 см глубины профиля. Поверхность почвы крайне не выровнена, причем как из-за физических нарушений при работе тяжелой техники во время тушения пожаров, так и по причине выгорания торфа, сопровождавшегося просадками поверхности с дальнейшим заболачиванием. Фитоценоз представлен злаками и осокой.

Агрохимический анализ почвенных проб выполнен с использованием методов, рекомендованных ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова [21]. Легкоразлагаемое органическое вещество (ЛОВ) определяли методом флотации в тя-

желой жидкости по Ганжаре–Борисову [22], содержание гумуса – по ГОСТ 26213–84 (Определение гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО), содержание общего углерода почвы – методом Института торфа [23]. Суть последнего заключается в том, что почву заливают смесью концентрированной серной кислоты и бихромата калия и подвергают кипячению в течение 5 мин, вследствие чего экстрагированию подвергается практически все органическое вещество за исключением свежих растительных остатков. Данный метод применим к почвам различной степени оторфованности. Статистическая обработка аналитических данных выполнена с использованием метода дисперсионного анализа [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическая характеристика изученных почв приведена в табл. 1, урожайность биомассы растений на пробных площадках участка в месте закладки почвенных разрезов – в табл. 2.

В целом можно отметить, что доминирующий фитоценоз пойменных почв в основном представлен многолетними злаковыми травами семейства мятликовые (Poaceae): на фоновой территории это чаще всего лисохвост (*Alopecúrus*) и канареечник тростниковидный (*Phalaris arundinacea*), на пирогенных почвах – низкокачественные многолетние злаки: вейник тростниковый (*Calamagróstis arundinácea*), вейник наземный (*Calamagróstis epigéjos*), пырей ползучий (*Elytrigia répens*), щучка (*Deschámpsia*) и др. По берегам каналов ирригационной системы имеется древесно-кустарниковая поросль, состоящая, чаще всего, из ив и берез. Фитоценоз береговой линии представлен в основном жесткостебельным сорным травостоем, использование которого в кормовых целях затруднено и даже невозможно.

Таблица 3. Агрохимическая характеристика исследованных почвенных образцов

Место отбора образца	рН _{KCl}		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	ед. рН	% к фону	мг/кг	% к фону	мг/кг	% к фону
Разр. 1 (фон), Ад	5.65	—	16	—	25	—
Т1	5.60	—	11	—	15	—
Т2	5.55	—	9	—	17	—
Средние фона	5.60	—	12	—	19	—
Разр. 2 – Пт	6.45	+15	18	+50	30	+58
Разр. 3 – Пт	6.35	+13	14	+17	27	+42
Разр. 4 – Пт	6.40	+14	11	–8	25	+32
Средние пирогенных почв	6.40	+14	14	+19	27	+44
<i>HCP</i> ₀₅	0.11	—	6	—	9	—

Таблица 4. Компонентный состав органического вещества аллювиально-болотной иловато-торфяной ранее осушенной почвы как следствие пирогагенеза, % к массе почвы

Образец почвы	Углерод общий		Углерод гумуса		Масса ЛОВ	
	содержание*	± к фону	содержание*	± к фону	содержание*	± к фону
A0 (фон)	39.2	—	14.9	—	1.90	—
A0 – среднее разр. 2–4	19.1		7.54		0.54	
T1 (фон)	40.2	—	17.2	—	1.71	—
T2 (фон)	49.7	—	19.9	—	2.17	—
Средние фона	45.0	—	18.9	—	1.94	—
Пт – разрез № 2	14.6	–30.4	3.82	–15.1	0.48	–1.46
Пт – разрез № 3	15.6	–29.4	3.71	–15.2	0.58	–1.36
Пт – разрез № 4	15.2	–29.8	2.30	–16.6	0.34	–1.60
Средние пирогагенных почв	15.1	–29.9	3.28	–15.6	0.47	–1.47
<i>HCP</i> ₀₅	0.56		0.58		0.24	

*Объем выборки равен 8.

Учет количества наземной биомассы растений показал, что пожары на осушенных торфяных почвах крайне негативно отражаются на их продуктивности. Например, в среднем на участках, подверженным пирогагенезу, снижение массы растений в сравнении с естественными их аналогами, превышало 50%. Отмечено также, что со временем на ранее осушенных аллювиально-болотных иловато-торфяных почвах происходило некоторое восстановление растительности. Результаты показали, что урожайность трав на участке, характеризуемом разр. № 2 (8 лет после пожара) была существенно больше, чем на участке, характеризуемом разрезом № 3 (4 года после пожаров), хотя и не достигала уровня фонового варианта.

Результаты анализа основных агрохимических показателей верхнего слоя фоновой аллювиально-болотной иловато-торфяной почвы свидетельствовали о том, что почва характеризовалась близкой к нейтральной реакцией среды, очень низким содержанием подвижных соединений фосфора и калия (табл. 3).

Установлено, что в торфяной почве после пожаров наблюдали тенденцию к увеличению содержания подвижных соединений фосфора и калия (относительно контроля – на 50%, но абсолютное содержание этих питательных элементов было очень низким). Отмечено также повышение величины показателя pH_{KCl} , т.е. происходила нейтрализация среды. Причиной некоторого повышения плодородия и нейтрализации среды

могло быть накопление золы в обугленных горизонтах пирогагенного профиля, что отмечали отдельные авторы [14].

В таких условиях для снижения негативного воздействия последствий торфяных пожаров на окружающую среду, а также для восстановления верхнего плодородного слоя почвы необходимо проведение специальных мероприятий, реализуемых в рамках рекультивации деградированных земель, среди которых должны присутствовать мероприятия не только технического этапа, но и биологического. На восстановление же растительности и флористического состава торфяников требуется не менее 3–5 лет [2, 25].

Органическое вещество аллювиальных болотных почв, в соответствии с генезисом, представлено оторфованными, не потерявшими анатомического строения растительными остатками, слабо минерализованными и частично гумифицированными. Кроме этого, в его состав входит легкоразлагаемое органическое вещество (ЛОВ) и собственно гумусовые вещества. Результаты определения компонентного состава органического вещества почвы приведены в табл. 4.

Валовые запасы общего углерода почвы в образцах торфяных горизонтов, не подвергавшихся возгоранию, велики и изменялись в диапазоне от 40 до 50%, что в среднем составило 45% к массе почвы. В целом это свидетельствовало о нормальном естественном почвообразовании и ненарушенном сложении почвенного профиля. В горизонте A0 (дернина, слой 0–4 см) запасы углерода

органической массы почвы были несколько меньше, чем в торфсодержащем слое, что, по сути, есть следствие наличия в дернине большой массы живых корней (углерод свежего растительного вещества этим методом анализа не определяется).

Пирогенная аллювиальная болотная почва отличалась от естественных почв резким снижением содержания общего углерода во всей толще, подвергшейся возгоранию. По свидетельству [26], пожары на торфяниках оказывают значительное влияние на их углеродный баланс, что будет определять восстановление экосистем в дальнейшем. Например, в дернине пирогенной аллювиально-болотной иловато-торфяной почвы величина $C_{\text{общ}}$ составляла 19.1% – это в 2 раза меньше, чем содержание общего углерода в дернине фоновой почвы. Содержание общего углерода в торфяных почвенных горизонтах пирогенных почв в сравнении с естественной (фоновой) почвой снизилось в 3 раза. Последнее можно объяснить не только результатом возгорания, но и следствием усиления минерализации за счет приобретения оторфованными растительными остатками гидрофобных свойств, что, например, отмечено в работе [21].

Осушенные аллювиальные болотные почвы характеризуются более интенсивным гумусообразованием в силу изменившегося водно-воздушного режима, поэтому, в отличие от аналогичных почв с естественным избыточным увлажнением, они содержат большее количество гумусовых веществ. Содержание углерода гумуса в торфяных горизонтах почв, не нарушенных пожаром, составляло 18.9%, в образцах почв пирогенных участков его содержание было в 5.8 раза меньше (среднее содержание – 3.28, с диапазоном от 2.30 до 3.82%) в сравнении с естественными почвами. При этом установлено, что на долю углерода гумуса в составе общего содержания органического вещества в почвах естественного состояния приходилось 40–49%, в пирогенных – от 15 до 26%. Разница между общим углеродом и углеродом гумуса при этом обусловлена присутствием в общем количестве углерода почвы не только углерода собственно гумусовых веществ, но и углерода неспецифического органического вещества (лигнинов, целлюлозы, в т.ч. детрита).

Важной характеристикой органического вещества почв является ЛОВ, в состав которого входят полуразложившиеся, потерявшие анатомическое строение и частично гумифицированные растительные остатки. ЛОВ принадлежит важная

роль в обеспечении растений питательными элементами, в образовании почвенной структуры, в оптимизации физических свойств почв и в целом в формировании почвенного плодородия. В аллювиальных болотных осушенных почвах содержание легкоразлагаемого органического вещества меняется от 1.7 до 2.2%, что значительно больше по сравнению с зональными серыми лесными почвами [27]. В пирогенных почвах, вследствие того, что большая часть органического вещества уничтожена пожаром, количество ЛОВ в почве конкретного участка (разр. №№ 2–4) снизилось во всех почвенных горизонтах, затронутых возгоранием, в среднем в 4 раза.

ВЫВОДЫ

1. Аллювиальные болотные иловато-торфяные осушенные почвы обследованного земельного участка, подвергшиеся возгоранию, утратили до 40–50% торфяной толщи, что отразилось на морфологическом строении профиля, “проседании” пирогенных участков на 60–70 см по сравнению с участками, не затронутыми пожаром. Это привело к застою влаги в образовавшихся замкнутых понижениях и их заболачиванию.

2. Установлено, что содержание подвижных соединений фосфора и калия в пирогенных почвах относительно фоновых почв естественного сложения повысилось на 50%, но абсолютное содержание этих питательных элементов осталось очень низким. Отмечено также повышение величины pH_{KCl} , что свидетельствовало о процессе нейтрализации среды.

3. Пирогенный фактор существенно отразился на содержании и составе органического вещества. Общее количество углерода в пирогенных почвах сократилось в 3 раза (с 40–49 до 14–15%) в основном за счет выгорания растительных остатков, составляющих основу торфа и легкоразлагаемого органического вещества, количество которого, в свою очередь, снизилось более чем в 4 раза по сравнению с почвами в естественном состоянии (с 1.94 до 0.47%).

4. Наибольшим негативным изменениям вследствие пожара подверглись собственно гумусовые вещества: содержание углерода гумуса снизилось более чем на 80 отн. %, меняясь в пределах 2.3–3.8% против 17.2–19.8% в почвах естественного сложения. Учитывая, что пирогенные горизонты приобрели ярко бурую окраску, можно констатировать, что наиболее глубокому расщеплению и гидролизу подверглись темноокрашенные гуминовые кислоты.

5. Продуктивность наземного фитоценоза аллювиально-болотных иловато-торфяных осушенных почв, подвергшихся пирогенезу, резко сократилась, составляя в настоящее время не более 50% продуктивности таких почв естественно-го сложения, оцениваемой в 1.06 т сена/га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Keith L. McDougall* Grazing and fire in two subalpine peatlands // *Austral. J. Botany*. 2007. V. 55 (1) P. 42–47.
2. *Дутов А.А., Габов Д.Н.* Pyrogenic alterations of Podzols at the North-east European part of Russia: Morphology, carbon pools, PAH content // *Geoderma*. 2015. V. 241–242. P. 230–237.
3. *Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П.* Пирогенная и гидротермическая дегградация торфяных почв, их агроэкология, песчаные культуры земледелия, рекультивация. М.: Изд-во МГУ, 2002. 168 с.
4. *Титова В.И., Дабахов М.В., Ветчинников А.А., Гордеев В.М.* Влияние мероприятий по локализации пожаров на торфяных почвах на их агрохимическую характеристику // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2018. № 2 (362). С. 23–27.
5. *Kuntze H.* Prozesse der Bodenentwicklung auf Sandmischkulturen // *Berichte der Sektion der DGMT*. Hannover, 1987. Bd. 17. P. 294–297.
6. *Turunen A., Rikala R., Saarikko J., Huuskonen P.* Boron deficiency causes growth disturbance in spruce forests on slash-burnt areas // *Metla*. 2004. V. 1. P. 43.
7. *Горбунова Ю.С., Девятова Т.А., Григорьевская А.Я.* Влияние пожаров на почвенный и растительный покров лесов центра Русской равнины // *Вестн. ВГУ. Сер. А. Химия. Биология. Фармация*. 2014. № 4. С. 52–56.
8. *Зайдельман Ф.Р., Банников М.В., Шваров А.П.* Пирогенные образования на месте осушенных сгоревших почв – свойства и плодородие // *Почвоведение*. 1999. № 9. С. 1150–1159.
9. *Зайдельман Ф.Р., Банников М.В., Шваров А.П.* Последствия пожаров на осушенных торфяных почвах // *Мелиорац. и водн. хоз-во*. 2001. № 2. С. 40–44.
10. *Зайдельман Ф.Р., Банников М.В., Шваров А.П.* Структура и экологическая оценка пирогенных образований на сгоревших осушенных торфяных почвах // *Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение*. 1998. № 2. С. 26–31.
11. *Титова В.И., Ветчинников А.А., Гордеев В.М.* Оценка состояния почвы, подвергшейся термическому воздействию при аварии на магистральном газопроводе // *Агрохим. вестн.* 2018. № 1. С. 41–45.
12. *Бадмажапова И.А., Гынинова А.Б., Гончиков Б.Н.* Изменение химических свойств осушенных торфяных почв под влиянием огневого фактора Будмажапова // *Вестн. КрасГАУ*. 2014. № 5. С. 50–55.
13. *Maioli O.L., Knoppers B.A., Azevedo D.A.* Sources, distribution and variability of hydrocarbons in total atmospheric suspended particulates of two Brazilian areas influenced by sugarcane burning // *J. Atmos. Chem*. 2009. V. 64. P. 159–178.
14. *Vergnoux A., Malleret L., Asia L., Doumenq P., Theraulaz F.* Impact of forest fires on PAH level and distribution in soils // *Environ. Res.* 2011. V. 111. P. 193–198.
15. *Голощанова Ю.Ю., Калинин Н.А.* Влияние пожара на органическое вещество темно-серых лесных почв // *Омск. науч. вестн.* 2012. №1(108). С. 217–220.
16. *Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Брянин С.В.* Влияние лесных пожаров на гумусово-энергетическое состояние буроземов Приамурья // *Вестн. КрасГАУ*. 2012. № 5. С. 121–124.
17. *Коган Р.М., Панина О.Ю.* Исследование влияния лесных пожаров на почвы широколиственных лесов (на примере Еврейской автономной области) // *Регион. проблемы*. 2010. Т. 13. № 1. С. 67–70.
18. *Никитин Б.А., Гогмачадзе Г.Д.* Пахотные почвы Нижегородской области. Н. Новгород, 2003. 176 с.
19. *Классификация и диагностика почв СССР*. М.: Колос, 1977. 224 с.
20. *Hooijer A., Page S., Canadell J. G., Silvius M., Kwadijk J., Wosten H., Jauhiainen J.* Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia // *Bio-geosciences*. 2010. V. 7. P. 1505–1514.
21. *Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия земель сельскохозяйственного назначения*. М.: ВНИИА, 2003. 195 с.
22. *Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А.* Гумусообразование и агрономическая оценка органического вещества почв. М.: Агроконсалт, 1997. 82 с.
23. *Лиштван И.И., Коваль Н.Т.* Основные свойства торфа и методы его определения. Минск: Изд-во Наука и техника, 1975. 320 с.
24. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: ИД Альянс, 2011. 352 с.
25. *Kettridge N., Thompson D.K., Waddington J.M.*, Impact of wildfire on the thermal behavior of northern peatlands: Observations and model simulations // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. 14–20.
26. *Kettridge N., Humphrey R.E., Smith J.E., Lukenbach M.C., Devito K.J., Petrone R.M., Waddington J.M.* Burned and unburned peat water repellency: Implications for peatland evaporation following wildfire // *J. Hydrol.* 2014. V. 513. P. 335–341.
27. *Полякова Н.В., Лавринова М.Г., Володина Е.Н.* Органическое вещество аллювиальных почв разной степени гидроморфизма // *Плодородие*. 2016. № 3. С. 13–15.

Effects of Pyrogenesis on the Productivity of Phytocenosis, Content and Component Structure of Organic Substance Drained Alluvial-Marsh Silt-Peat Soil

V. I. Titova^{a,#} and N. V. Polyakova^a

^a*Nizhny Novgorod State Agricultural Academy
pl. Gagarina 97, Nizhny Novgorod 603107, Russia*

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

It is presented the results of a study of the state of drained alluvial peat soils in an area of 63 hectares exposed to fire in 2010 (soil profile 2), 2013–2014 (soil profile 3) and in 2017 (soil profile 4). The background soil is classified as drained alluvial-swamp silt-peat soil (soil profile 1). Field survey was conducted in 2018 with the selection of soil samples. The samples determined the pH of the salt extract, provision of mobile compounds of phosphorus and potassium, content and composition of organic matter, and phytocenosis productivity on trial plots located near soils profiles. It has been established that pyrogenesis led to the loss of 40–50% of the peat layer, subsidence the earth's surface, stagnation of moisture in closed depressions and waterlogging territory. The mobile potassium and phosphorus compound level in the soil suffered a fire increases by 50% relative to the reference value. But it remains still very low. Total carbon in the peat horizons of pyrogenic soils in comparison with the background soil decreased by 3 times (from 40–49% to 14–15%), and the content of easily decomposed organic matter decreased by more than 4 times (from 1.94 to 0.47%). The carbon content of humus decreased by more than 80 relative percent fluctuating in the range of 2.3–3.8% versus 17.2–19.8% in the background soil. The productivity of land phytocenosis of soils, subjected to pyrogenesis, decreased making up no more than 50% of the productivity of such soils of natural composition, estimated at 1.06 tons of hay/hectare.

Keywords: drained alluvial-marsh silt-peat soil, pyrogenesis, component composition of organic matter, phytocenosis productivity.

УДК 631.8:631.51

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

© 2020 г. В. И. Турусов¹, В. М. Гармашов^{1,*}

¹ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева
Каменная Степь 397463 Воронежская обл., Таловский р-н, пос. 2-го участка Института им. В.В. Докучаева,
квартал 5, 81, Россия

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

Поступила в редакцию 23.03.2019 г.

После доработки 15.06.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

Анализ результатов многолетних исследований и модельных опытов, проведенных с целью изучения эффективности минеральных удобрений при различных способах обработки почвы (размещении удобрений в обрабатываемом слое) в почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР показал, что наибольший эффект от применения минеральных удобрений N60P60K60 достигался при равномерном распределении удобрений в слое почвы 7–21...0–21 см при вспашке на глубину 20–22 см и комбинированной (сочетании различных обработок) системе обработки почвы в севообороте, построенной с учетом биологических особенностей выращиваемых культур. При таких обработках почвы средневегетационное превышение содержания нитратного азота в слое почвы 0–40 см над удобренным фоном составляло 1.9–2.5 мг/кг абсолютно сухой почвы, превышение содержания подвижного фосфора – 4.3–2.8 мг/100 г почвы, обменного калия – на 34.8 и 32.8%. Такое размещение минеральных удобрений в обрабатываемом слое обеспечило лучшее качество полученной продукции. Содержание азота в зерне ячменя было максимальным и составляло 2.20–2.18%, белка – 12.5–12.4%.

Ключевые слова: минеральные удобрения, нитратный азот, подвижный фосфор, обменный калий, способ обработки почвы, глубина.

DOI: 10.31857/S0002188120120121

ВВЕДЕНИЕ

Стратегическим направлением повышения эффективности земледелия и сельскохозяйственного производства является рациональное использование средств интенсификации. По оценкам ученых, использование минеральных удобрений обеспечивает от 41 до 50% прироста урожая культурных растений [1–3]. По данным ФАО, корреляция стоимости собранного урожая с объемами применения минеральных удобрений в 40 странах мира составляет в последние годы 0.85 [4]. В то же время, в силу разных причин эффективность применения удобрений в нашей стране довольно низкая. Окупаемость 1 кг NPK в хозяйствах составляет 4–6 кг зерна, тогда как оптимальным считается соотношение 10–12 кг зерна/кг NPK [5]. В связи с этим зачастую стоимость прибавки урожая от применения удобрений не окупает тех денежных затрат, которые пошли на приобретение и внесение минеральных удобрений. Поэтому поиск путей повышения эффек-

тивности применения удобрений имеет большое теоретическое и практическое значение.

Важную роль в повышении эффективности использования минеральных удобрений, наряду с другими приемами (дозы, сроки внесения и др.), играют способы их заделки, определяемые приемом обработки почвы [6–9], т.к. усвояемость питательных веществ из удобрений и почвы зависит от концентрации гранул удобрений в различных по увлажнению слоях почвы. Эффективность использования питательных веществ из почвы снижается при попадании их в слои почвы с дефицитом влаги или недостаточно увлажненные. Поэтому совершенствование технологии внесения удобрений должно осуществляться на адаптивной основе с максимальным учетом почвенно-климатических и ландшафтных условий, особенностей каждого конкретного землепользования. Такой подход обеспечит комплексное решение проблем повышения плодородия почвы, эффек-

тивности удобрений и продуктивности выращиваемых культур.

В зависимости от приема и глубины обработки почвы минеральные удобрения по-разному распределяются в пахотном слое, попадая в разные его прослойки. В модельных опытах установлено, что при вспашке в слой 0–10 см попадает 15% удобрений, в слой 10–20 см – 38, в слой 20–30 см – 47, при безотвальной обработке – соответственно 55, 31, 14% [10].

В научной литературе нет единой точки зрения относительно влияния различных приемов обработки почвы на эффективность использования минеральных удобрений. По данным [11], наибольшую эффективность имело внесение НРК на глубину 10 см и перемешивание их в слое 0–10 см. Поверхностное внесение удобрений или же перемешивание в слое почвы 5 см снижало эффект действия удобрений на 5–7%. К тому же безотвальная обработка усиливает неблагоприятную дифференциацию корнеобитаемого слоя по плодородию и снижает действие удобрений [6].

Результаты других исследований показали, что наибольший эффект от удобрений достигается при переменной по глубине и способам системе основной обработки в севообороте, формирующей мощный культурный пахотный слой [12]. В ряде работ [13, 14] отмечено, что минеральные удобрения равнозначно действуют при различных способах основной обработки почвы.

Есть исследования, где показано, что эффективность удобрений зависит как от различного размещения их в пахотном слое почвы, так и от погодных условий вегетационного периода [11].

Противоречивость мнений и выводов, существующих в научной литературе, о влиянии различных технологий основной обработки на эффективность вносимых удобрений, а также недостаточность экспериментальных данных на черноземных почвах послужили основанием для анализа собственных исследований. Цель работы – изучить влияние способов и систем механической обработки почвы на эффективность минеральных удобрений на черноземе обыкновенном (сегрегационном) в условиях юго-востока ЦЧР.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования был чернозем обыкновенный (сегрегационный) среднегумусный среднемощный, тяжелосуглинистый, с благоприятными физико-химическими и агрохимическими показателями, и агрохимической характеристикой слоя 0–30 см почвы: содержание гумуса

(по Тюрину в модификации В.Н. Симакова, ГОСТ 2613-91) – 6.48%, общего азота (по Гинзбургу) – 0.346%, общего фосфора (по Гинзбургу–Щегловой) – 0.208%, общего калия (по Ожигову) – 1.85%, азота гидролизующего (по Тюрину–Кононовой) – 61.2 мг/кг почвы, сумма поглощенных оснований (ГОСТ 27821-88) – 66.4 мг/кг почвы, pH_{KCl} 6.99, гидролитическая кислотность – 0.57 мг-экв/100 г почвы. Обработку экспериментальных данных осуществляли дисперсионным методом математического анализа с использованием программного обеспечения ПК.

Наблюдения, анализы и учет проводили согласно действующим методикам, принятым в полевых и лабораторных исследованиях по земледелию [15–17].

В статье проанализированы результаты исследований, полученные в многолетнем полевом стационарном опыте, краткосрочном и модельных микрополевых опытах, в которых изучали различные способы и глубину основной обработки почвы с применением минеральных удобрений при ежегодном внесении N60P60K60 в виде АФК и без применения удобрений. Схема многолетнего стационарного опыта, варианты: ежегодная вспашка на глубину 20–22 см (контроль); то же на глубину 25–27 см; то же на глубину 30–32 см; то же на глубину 35–37 см; разноглубинная вспашка в севообороте двухъярусным плугом; разноглубинная вспашка в севообороте; комбинированная разноглубинная обработка в севообороте (30% – плоскорезная); комбинированная разноглубинная обработка в севообороте (60% – плоскорезная); разноглубинная плоскорезная обработка; ежегодное рыление плугом без отвалов на глубину 25–27 см. Обработки почвы изучали в 10-польном зернопропашном севообороте с чередованием культур: кукуруза на зеленый корм – озимая пшеница – сахарная свекла – однолетние травы – озимая пшеница – кукуруза на зерно – горох – озимая пшеница – подсолнечник – ячмень. Повторность в опыте трехкратная, площадь делянки по обработке почвы (фактор А) – 720 м², удобрениям (фактор В) – 360 м², учетной – 200 м². Исследования проводили во 2-й и начале 3-й ротациях севооборота (1988–1994 гг.). В опыте высевали сорта культур, районированных в годы проведения исследований.

Схема краткосрочного опыта: вспашка на глубину 20–22 см (контроль); вспашка ступенчатым плугом на глубину 20–30 см; вспашка двухъярусным плугом на глубину 20–22 см; вспашка на глубину 20–22 см + чизелевание на глубину 45 см; чизелевание на глубину 20–22 см; чизелевание на

глубину 45 см; обработка параплау на глубину 20–22 см; обработка плоскорезом на глубину 20–22 см; обработка стойками СибИМЭ на глубину 20–22 см; без основной обработки почвы. Повторность в опыте трехкратная, площадь делянки по обработке почвы (фактор *A*) – 720 м², удобрениям (фактор *B*) – 360 м², учетной – 200 м². В опыте высевали ячмень сорта Одесский 100. Годы исследований – 1988–1991 гг.

Вспашку делянок на глубину 20–35 см проводили плугом ПН-4-35, двухъярусную вспашку – ПЯ-3-40; чизельную обработку – ПЧ-2,5; плоскорезную обработку – КПГ-250; безотвальное рыхление почвы – плугом ПН-4-35 со снятыми отвалами и плугом ПН-4-35 со стойками СибИМЭ. При посеве зерновых и зернобобовых культур использовали сеялку СЗ-3,6, пропашных культур – СУПН-8. Уборку проводили комбайном “Сампо-500”.

Изучение способов обработки почвы вели на удобренном и неудобренном фонах. На удобренном фоне удобрения вносили из расчета N60P60K60 ежегодно под основную обработку почвы, под все культуры севооборота. Удобрения на делянках вносили вручную, в разброс.

Отбор почвенных образцов производили по слоям 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 см на первом и третьем повторениях опыта из 5-ти скважин на делянке.

Для более детального изучения эффективности минеральных удобрений в зависимости от глубины заделки и распределения в обрабатываемом слое был заложен микрополевым опытом. Схема опыта: на фоне вспашки на глубину 20–22 см удобрения N60P60K60 в виде АФК заделывали в слой почвы: 1 – 0–7 см, 2 – 7–14 см, 3 – 14–21 см, 4 – 0–14 см, 5 – 7–21 см, 6 – 0–21 см. Повторность в опыте шестикратная. Размер делянки 1.2 м × 1.2 м, площадь посевной делянки – 1.44 м², учетной – 1.0 м². Учет урожая проводили вручную взятием снопов. В опыте высевали ячмень сорта Одесский 100. Исследования проводили в 2007–2009 гг. Удобрения на делянках вносили вручную, с выемкой слоев почвы и смешиванием удобрений в изучаемом слое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении различных приемов обработки почвы отвальных и безотвальных, с различным формированием обрабатываемого слоя, установлено, что в почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР с недостаточным увлажнением наибольшая эффективность от внесенных мине-

ральных удобрений в повышении содержания нитратного азота в почве была при вспашке на глубину 20–22 см, где средневегетационное превышение содержания нитратного азота в слое почвы 0–40 см при внесении минеральных удобрений в виде АФК в дозе N60P60K60 было максимальным и составило 1.9 мг/кг абсолютно-сухой почвы по сравнению с неудобренным фоном (табл. 1).

Отсутствие перемешивания обрабатываемого слоя с минеральными удобрениями и концентрация их в верхних слоях при применении безотвальной обработки почвы приводило к снижению эффективности удобрений в повышении обеспеченности почвы нитратным азотом. При чизелевании на глубину 45 см превышение содержания нитратного азота в почве при внесении удобрений над неудобренным вариантом составило 1.5 мг/кг абсолютно-сухой почвы (а.с.), при плоскорезной обработке на глубину 20–22 см – 0.9 мг/кг а.с. почвы. При сосредоточении минеральных удобрений на поверхности почвы при нулевой обработке, эффект от их внесения был минимальным, содержание нитратного азота в слое почвы 0–40 см повысилось лишь на 0.7 мг/кг а.с. почвы.

Аналогичная закономерность прослежена и в многолетнем стационарном опыте. Наряду с тем, что при систематическом ежегодном применении способы обработки почвы оказывали большее влияние на питательный режим чернозема обыкновенного, наибольшее содержание нитратного азота в слое 0–40 см почвы также было при вспашке на глубину 20–22 см (рис. 1).

В этом же случае был и наибольший эффект от внесения удобрений. Превышение содержания нитратного азота в слое 0–40 см почвы над неудобренным фоном составило 2.5 мг/кг а.с. почвы. Систематическое применение обработки почвы без оборота пласта плоскорезной разнотравной и рыхления плугом без отвалов на глубину 25–27 см приводило к снижению содержания нитратного азота в сравнении со вспашкой на глубину 20–22 см и уменьшению эффекта от применения удобрений в повышении его содержания в почве. Сосредоточение гранул минеральных удобрений преимущественно в поверхностном слое почвы при безотвальной обработке снижало эффект от внесения удобрений. При таких агротехнических условиях превышение содержания нитратного азота в почве при внесении удобрений над естественным фоном составляло 1.3–1.2 мг/кг а.с. почвы в слое 0–40 см.

Таблица 1. Влияние приемов и глубины основной обработки почвы в сочетании с удобрениями под ячмень на средневегетационное содержание элементов минерального питания в слое почвы 0–40 см (1988–1991 гг.)

Обработка почвы и глубина	Фон	Содержание		
		N-NO ₃ , мг/кг	P ₂ O ₅	K ₂ O
			мг/100 г	
Вспашка на 20–22 см (контроль)	<i>A</i>	13.2	13.6	9.2
	<i>B</i>	15.1/1.9*	14.4/0.8	10.3/1.1
Чизелевание на 45 см	<i>A</i>	11.8	14.1	9.8
	<i>B</i>	13.3/1.5	15.4/1.3	10.8/1.0
Плоскорезная на 20–22 см	<i>A</i>	12.7	14.0	9.4
	<i>B</i>	13.6/0.9	15.7/1.7	10.1/0.7
Без основной обработки почвы	<i>A</i>	11.8	13.9	9.6
	<i>B</i>	12.5/0.7	15.3/1.4	10.3/0.7
<i>HCP</i> ₀₅ обработка	частный эффект	2.1	1.2	1.1
	главный эффект	1.5	0.9	0.8
<i>HCP</i> ₀₅ удобрение	частный эффект	1.4	0.8	0.7
	главный эффект	0.5	0.3	0.2

*Увеличение содержания элемента в почве при внесении удобрений.

Увеличение глубины отвальной обработки почвы свыше 25–27 см с перемещением удобрений в более глубокие слои также приводит к существенному снижению содержания нитратного азота и эффективности применяемых удобрений в повышении обеспеченности чернозема обыкновенного азотом. При таком формировании обрабатываемого слоя часть нитратного азота смещается в более глубокие горизонты корнеобитаемого

слоя, и, как считают некоторые исследователи, нитратный азот, мигрировавший на глубину более 60 см, считается неэффективным в продукционных процессах для зерновых культур [18].

Применение ежегодной вспашки на глубину 25–27 см, так же как и комбинированной обработки почвы в севообороте (чередование отвальной обработки с безотвальной) с 30%-ным насыщением плоскорезной обработкой на глубину

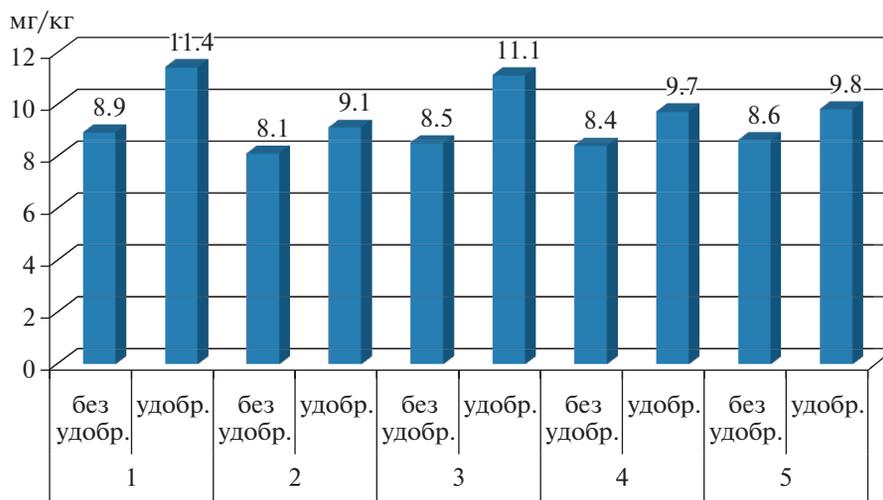


Рис. 1. Содержание нитратного азота в слое 0–40 см при различных способах обработки почвы на неудобренном и удобренном фонах (средние за вегетационный период во 2-й ротации севооборота, 1988–1994 гг.): 1 – ежегодная вспашка на глубину 20–22 см, 2 – ежегодная вспашка на глубину 30–32 см, 3 – комбинированная в севообороте, 4 – плоскорезная разноглубинная, 5 – ежегодная безотвальная на глубину 25–27 см. То же на рис. 2, 3. *HCP*₀₅ частных эффектов: фактор *A* = 0.5, фактор *B* = 0.8 мг/кг.

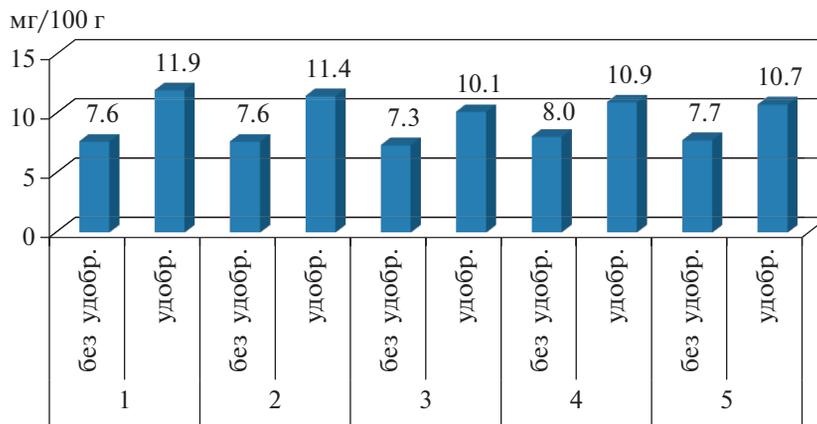


Рис. 2. Содержание подвижного фосфора в слое почвы 0–40 см в среднем за вегетационный период при различных системах обработки почвы во 2-й ротации 10-польного севооборота на удобренном и удобренном фонах (1988–1994 гг.). $HCPO_5$ частных эффектов: фактор $A = 0.7$, фактор $B = 0.9$ мг/100 г почвы.

10–12 см под озимые, обеспечивало нитратный режим чернозема обыкновенного в слое 0–40 см и эффект от внесения удобрений на уровне контрольного варианта – систематической вспашки на глубину 20–22 см.

Фосфор является одним из важнейших элементов минерального питания растений [19]. На данный период более 70% пахотных земель недостаточно обеспечены подвижными фосфатами и нуждаются в кардинальном улучшении фосфатного режима. В настоящее время на поля нашей страны вносят в среднем не более 2 кг P_2O_5 , что в 50 раз меньше, чем в странах Европы [20].

Наряду с тем, что фосфор мало передвигается по профилю почвы, эффект от внесения фосфора с удобрениями в повышении его содержания в почве в краткосрочном опыте был несколько больше при безотвальной и нулевой обработках, где внесенные удобрения концентрировались в поверхностном слое почвы (табл. 1).

По результатам исследований, полученным в многолетнем стационарном опыте при применении удобрений, наиболее высокое содержание подвижного фосфора в слое 0–40 см почвы и наибольший эффект от применения удобрений отмечены при отвальной системе обработки – ежегодной вспашке на глубину 20–22 см, где происходило равномерное распределение гранул минеральных удобрений в слое 0–22 см почвы (рис. 2).

Систематическая безотвальная обработка почвы в севообороте не снижала содержание доступного фосфора в черноземе обыкновенном в сравнении со вспашкой на глубину 20–22 см, но уменьшила эффект от применения удобрений, как и увеличение глубины вспашки.

При отвальной системе обработки почвы на глубину 20–22 см отмечена большая эффективность в повышении обеспеченности почвы обменным калием при внесении удобрений (рис. 3). Превышение содержания обменного калия в слое 0–40 см почвы на удобренном фоне над неудобренным составило 34.8%, при ежегодной вспашке на глубину 25–27 см – 28.4, в системе комбинированной обработки почвы в севообороте – 32.8, плоскорезной разноглубинной – 22.0, систематической обработке почвы плугом без отвалов на глубину 25–27 см – 27.0%.

Способы и глубина основной обработки почвы определяют размещение органических остатков и вносимых удобрений в обрабатываемом слое почвы, что сказывается на уровне содержания и распределении элементов минерального питания в почвенном профиле и, соответственно, доступности их корням растений. Безотвальные способы обработки почвы (без оборачивания и перемешивания обрабатываемого слоя) приводили к сосредоточению подвижных фосфатов преимущественно в верхней (0–10 см) части пахотного слоя (рис. 4).

Безотвальные приемы обработки параплау (аналогично плоскорезом и стойками СибИМЭ) на удобренном фоне приводили к увеличению содержания подвижного фосфора в слое почвы 0–10 см по отношению к слою 0–40 см – до 30.7%, а исключение основной обработки – до 32.4%, тогда как при вспашке на глубину 20–22 см количество фосфора в этом слое почвы составляло 26.0% (к слою 0–40 см). Исключение основной обработки, а также безотвальная обработка почвы приводили к уменьшению содержания доступного фосфора в слоях 20–30 и 30–40 см. Аналогич-

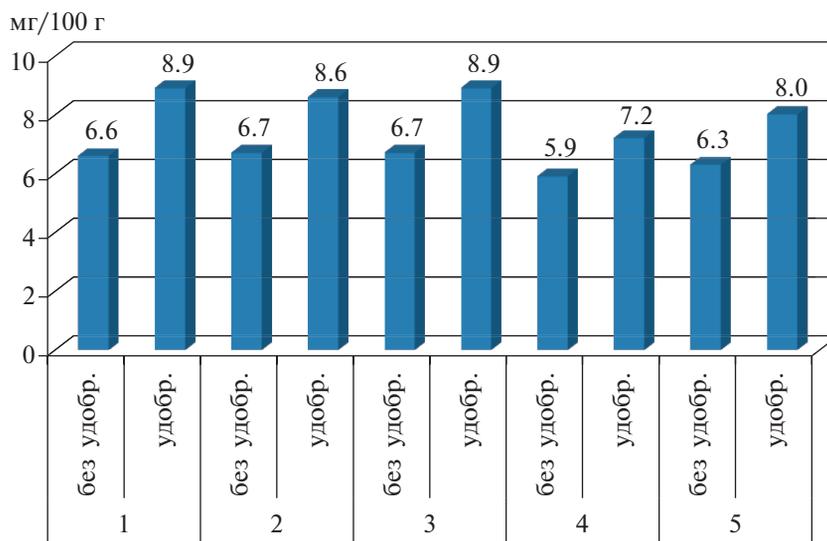


Рис. 3. Содержание обменного калия в слое почвы 0–40 см в среднем за вегетационный период при различных системах обработки почвы во 2-й ротации 10-польного зернопропашного севооборота на неудобренном и удобренном фоне (1988–1994 гг.). HCP_{05} частных эффектов: фактор $A = 0.6$, фактор $B = 0.8$ мг/100 г почвы.

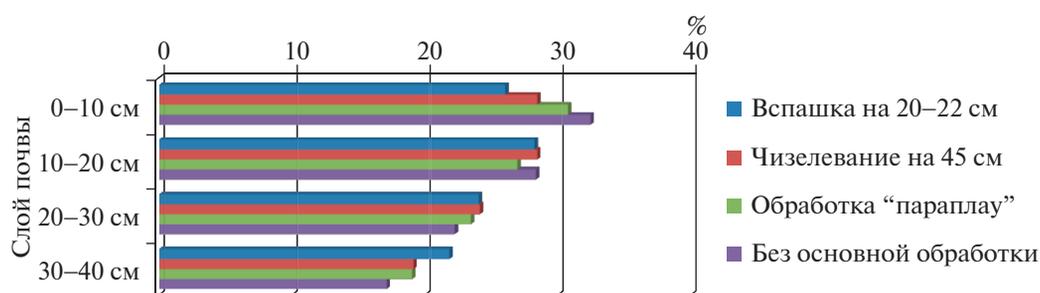


Рис. 4. Дифференциация почвенного профиля по содержанию подвижного фосфора при различных приемах обработки почвы под ячмень на удобренном фоне (1988–1991 гг.), % к слою 0–40 см.

ная закономерность прослежена и в содержании обменного калия в почвенном профиле.

Результаты проведенных исследований в модельных микрополевых опытах по изучению влияния глубины заделки и различного распределения минеральных удобрений в пахотном слое на плодородие почвы и урожайность ячменя подтвердили результаты, полученные в краткосрочных и многолетнем стационарном опытах. В почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР наибольший эффект в повышении содержания элементов минерального питания в почве в течение вегетации от применения минеральных удобрений отмечен при их заделке в слой 7–14 см и при равномерном распределении в слое 0–21 см. Как более глубокая, так и более мелкая заделка удобрений приводили к снижению их эффективности в повышении содержания элементов минерального питания в почве (табл. 2).

При таком размещении удобрений в обрабатываемом слое отмечена и наибольшая урожайность ячменя 2.60 и 2.62 т/га (табл. 3). Наименьшая эффективность от применения минеральных удобрений показана при сосредоточении их в поверхностном слое 0–7 см почвы, в этих условиях получена и наименьшая урожайность ячменя. В среднем за 3 года она составила 2.39 т/га.

Результаты исследований по изучению влияния глубины размещения удобрений в обрабатываемом слое на продуктивность ячменя, полученные в модельном микрополевом опыте, подтвердили основные положения, установленные в предыдущих опытах.

Изучение качества получаемой продукции показало, что наибольшее содержание азота, фосфора, калия и белка в зерне ячменя отмечено при заделке минеральных удобрений в слой 0–14...7–14 см, как это происходило при отвальных спосо-

Таблица 2. Содержание элементов минерального питания в слое почвы 0–30 см в течение вегетационного периода ячменя при различном распределении минеральных удобрений (N60P60K60) в обрабатываемом слое почвы (2007–2009 гг.)

Слой размещения минеральных удобрений	Кушение			Колошение			Созревание		
	N-NO ₃ *	P ₂ O ₅	K ₂ O	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
0–7 см	13.7	14.6	19.0	13.9	14.9	18.6	11.1	11.8	14.7
7–14 см	14.2	14.1	19.9	14.4	15.8	21.4	13.7	13.6	17.3
14–21 см	11.8	11.6	15.9	11.7	11.8	15.7	11.5	11.5	15.9
0–21 см	13.6	13.5	17.6	13.6	11.8	15.8	13.1	12.5	16.6
<i>HCP</i> ₀₅	1.9	2.5	2.7	1.9	2.4	2.4	2.1	1.9	2.3

бах обработки почвы, где содержание азота в зерне ячменя было максимальным и составляло 2.20%, а также при равномерном распределении их в слое 0–21 см, для которого этот показатель составлял 2.18% (табл. 4).

Более мелкая заделка минеральных удобрений (в слой 0–7 см), так же как и более глубокая (в слой 14–21 см) заделка, при внесении под основную обработку почвы снижали их эффективность в продукционных процессах в почвенно-клима-

тических условиях юго-востока ЦЧЗ. При заделке минеральных удобрений в слой 0–7 см содержание азота и белка в зерне ячменя снижалось на 1.8%, в слой 14–21 см – на 3.6%. При увеличении глубины заделки удобрений отмечено и снижение содержания калия в зерне ячменя – 6.1%. Снижение содержания белка в зерне на 1–2% может показаться несущественным, но увеличение белка в зерне на 1% равнозначно (по сбору белка) повышению урожайности на 6–7 ц/га [21].

Таблица 3. Урожайность ячменя при различной глубине заделки минеральных удобрений в обрабатываемый слой почвы (N60P60K60, 2007–2009 гг.), т/га

Вариант	Годы			Средние за 3 года
	2007	2008	2009	
Вспашка на глубину 20–22 см + N60P60K60 в слой 0–7 см	2.03	2.86	2.28	2.39
То же + N60P60K60 в слой 7–14 см	2.22	3.11	2.47	2.60
То же + N60P60K60 в слой 14–21 см	2.08	2.91	2.31	2.43
То же + N60P60K60 в слой 0–14 см	2.19	2.98	2.47	2.55
То же + N60P60K60 в слой 7–21 см	2.20	3.09	2.45	2.58
То же + N60P60K60 в слой 0–21 см	2.24	3.13	2.50	2.62
Вспашка на глубину 20–22 см без удобрений	1.82	2.69	2.21	2.24
<i>HCP</i> ₀₅	0.17	–	0.18	

Таблица 4. Химический состав и качество зерна ячменя при различной глубине заделки минеральных удобрений (2007–2009 гг.), %

Вариант	Содержание, %			
	N	P	K	белок
Вспашка на 20–22 см без удобрений	2.04	0.36	0.47	11.6
Вспашка на глубину 20–22 см + N60P60K60 в слой 0–7 см	2.16	0.36	0.49	12.3
То же + N60P60K60 в слой 7–14 см	2.20	0.36	0.49	12.5
То же + N60P60K60 в слой 14–21 см	2.12	0.35	0.46	12.1
То же + N60P60K60 в слой 0–14 см	2.20	0.35	0.48	12.5
То же + N60P60K60 в слой 7–21 см	2.13	0.35	0.46	12.1
То же + N60P60K60 в слой 0–21 см	2.18	0.35	0.46	12.4
<i>HCP</i> ₀₅	0.19	0.02	0.03	1.1

Учитывая, что возможность и эффективность потребления элементов минерального питания из почвы связана и с обеспеченностью почвы влагой, размещение гранул минеральных удобрений в более глубоких и влажных слоях пахотного горизонта обеспечивает и лучшее использование элементов минерального питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что эффективность применения удобрений зависела от их размещения в корнеобитаемом слое. Способы и глубина основной обработки почвы определяли размещение вносимых удобрений в обрабатываемом слое почвы, что сказалось на уровне содержания и распределении элементов минерального питания в почвенном профиле и доступности их корням растений.

В почвенно-климатических условиях юго-востока ЦЧР наибольший эффект от применения минеральных удобрений N60P60K60 получался при равномерном распределении гранул удобрений в слое 7–21...0–21 см почвы, как это происходит при вспашке на глубину 20–22 см и комбинированной системе обработки почвы в севообороте, построенной с учетом биологических особенностей выращиваемых культур. При таких обработках почвы средневегетационное повышение содержания нитратного азота в слое 0–40 см над неудобренным фоном составляло 1.9–2.5 мг/кг абсолютно сухой почвы, превышение содержания подвижного фосфора – 4.3–2.8 мг/100 г почвы, обменного калия – на 34.8 и 32.8%. Такое размещение минеральных удобрений в обрабатываемом слое обеспечивало наибольший эффект от их применения с получением максимальной урожайности и наилучшего качества продукции при содержании азота в зерне ячменя 2.20–2.18%, белка – 12.5–12.4%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прянишников Д.Н.* Об удобрении полей и севооборотах. М.: Изд-во МСХ РСФСР, 1962. 255 с.
2. *Кореньков Д.А., Синагин И.И., Петербургский А.В., Авдонин Н.С.* Удобрения, их свойства и способы использования. М.: Колос, 1982. 415 с.
3. *Ефимов В.Н., Донских И.Н., Сеницын Г.И.* Система применения удобрений. М.: Колос, 1984. 272 с.
4. Эффективность применения удобрений. URL: <http://www.activestudy.info/effektivnost-primeneniya-udobrenij/> (дата обращения 4.12.2018).
5. Движение к точности. URL: <http://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/stat/dvizhenit-k-tochhosti.htm> (дата обращения 11.12.2018).
6. *Медведев В.В.* Оптимизация агрофизических свойств черноземов. М.: Агропромиздат, 1988. 160 с.
7. *Сдобников С.С.* Пахать или не пахать? М., 1994. 288 с.
8. *Минакова О.А., Александрова Л.В., Тамбовцева Л.В.* Влияние 70-летнего применения удобрений на плодородие чернозема выщелоченного лесостепи ЦЧР и урожайность культур зерно-свекловичного севооборота // *Агрохимия*. 2009. № 4. С. 31–37.
9. *Никитин В.В., Акинчин А.В.* Биологизация земледелия в Центрально-Черноземном регионе: проблемы и решения // Биологизация адаптивно-ландшафтной системы земледелия – основа повышения плодородия почвы, роста продуктивности сельскохозяйственных культур и сохранения окружающей среды: Мат-лы Всерос. научн.-практ. конф. Белгород. НИИСХ РАСХН 12–13 июля 2012 г. Белгород, 2012. С. 192–202.
10. *Кондратенко В.Н., Хмельницкий А.А.* Какому способу основной обработки отдать предпочтение // Сахарная свекла. 2002. № 12. С. 28.
11. *Тюлин В.А., Сулягин В.П.* Повышение эффективности удобрений в условиях экологизации земледелия // Усп. совр. естествознания. 2016. № 11. С. 91–95. URL: <https://natural-sciences.ru/pdf/2016/11/36191.pdf>. (дата обращения 11.12.2018).
12. *Ильина Л.В.* Действие удобрений при разных системах обработки почвы // Ресурсосберегающие технологии обработки почвы: сб. науч. тр. ВНИИ-ЗиЗПЭ. Курск, 1989. С. 63–73.
13. Почвоохранное земледелие на склонах / сост. Мильчевская Л.Я. Киев: Урожай, 1988. 128 с.
14. *Каштанов А.Н., Явтушенко В.Е.* Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 240 с.
15. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. Изд. 5-е доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
16. *Доспехов Б.А., Васильев И.П., Туликов А.М.* Практикум по земледелию. Изд. 2-е доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
17. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
18. *Никитишен В.И.* Агрохимические основы эффективного применения удобрений в интенсивном земледелии. М.: Наука, 1984. 136 с.
19. *Минеев В.Г.* Агрохимические и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
20. *Сушеница Б.А.* Состояние проблемы фосфора в земледелии // Плодородие. 2006. № 2. С. 11–13.
21. *Артюшин А.М., Крищенко В.П.* Роль химизации в увеличении производства зерна пшеницы // Химия в сел. хоз-ве. 1984. Т. XXII. № 5. С. 8–13.

Efficiency of Mineral Fertilizers in Various Methods of Soil Treatment

V. I. Turusov^a and V. M. Garmashov^{a,#}

^a *V.V. Dokuchaev Research Institute of Agriculture of the Central Chernozem Strip
Stone Steppe Settlement of the 2nd section of the V.V. Dokuchaev Institute, quarter 5, 81, Voronezh region, Talovsky district
397463, Russia*

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

The analysis of the results of long-term studies and model experiments conducted to study the effectiveness of mineral fertilizers in various methods of soil treatment (fertilizer placement in the treated layer) in the soil and climatic conditions of the South-East of the Central Asian region showed that the greatest effect of the use of fertilizers N60P60K60 is obtained with a uniform distribution of fertilizers in the soil layer 7–21...0–21 cm when plowing to a depth of 20–22 cm and a combined (combination of different treatments) soil treatment system in crop rotation, built taking into account the biological characteristics of cultivated crops. With such tillage, the average increase in nitrate nitrogen content in the soil layer of 0–40 cm above the inconvenient background is 1.9–2.5 mg/kg of completely dry soil. Excess content of mobile phosphorus is 4.3–2.8 mg 100 g of soil, exchangeable potassium-by 34.8 and 32.8%. This placement of mineral fertilizers in the treated layer provides the best quality of the products. The nitrogen content in barley grain was maximum and amounted to 2.20–2.18%, protein – 12.5–12.4%.

Key words: mineral fertilizers, nitrate nitrogen, mobile phosphorus, exchange potassium, soil treatment method, depth.

УДК 631.811.1:631.421(470)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОТА В ДЛИТЕЛЬНЫХ И КРАТКОСРОЧНЫХ ОПЫТАХ АГРОХИМСЛУЖБЫ И ГЕОСЕТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2020 г. В. А. Романенков^{1,2}, М. В. Беличенко^{2,*}, О. В. Рухович²,
Л. В. Никитина², О. И. Иванова²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова. 31а, Россия

*E-mail: mybelichenko@gmail.com

Поступила в редакцию 10.07.2020 г.

После доработки 28.07.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

На основе баз данных длительных и краткосрочных опытов с удобрениями, расположенных в Нечерноземной зоне Российской Федерации и в Московской обл. на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, а также в Черноземной зоне на черноземах, проведено исследование эффективности использования азота (*NUE*) озимой пшеницей. Сравнили результаты краткосрочных исследований в 1972–1989 гг. и длительных опытов в 2005–2016 гг. с применением комбинированной системы индикаторов азотного питания растений. Установлено, что в диапазоне доз азота 100–150 кг/га/год в длительных опытах и 120–180 кг/га в краткосрочных опытах для дерново-подзолистых почв, 120–150 кг/га для черноземов в минеральной и органо-минеральной системах удобрения обеспечивался оптимальный баланс азота и наиболее полное использование внесенного удобрения растениями. Меньшие дозы азота определяли неустойчивость выноса в связи со значительной зависимостью урожайности от погодных условий и могли приводить к истощению почвы, большие дозы были потенциально опасными как источник загрязнения агроценозов в условиях избытка азота.

Ключевые слова: длительные и краткосрочные опыты, азотные удобрения, эффективность использования азота.

DOI: 10.31857/S0002188120120091

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большая потребность сельскохозяйственного производства в удобрениях, особенно в источниках азотного питания растений. Азот практически для всех почв является главным фактором, определяющим продуктивность основных сельскохозяйственных культур, поскольку является одним из важнейших элементов минерального питания растений, при недостатке которого невозможно обеспечить получение полноценного по количеству и качеству урожая сельскохозяйственной продукции [1, 2]. Обеспеченность растений азотом во многом определяет эффективность и устойчивость функционирования агроэкосистем. За последние 50 лет применение N-удобрений увеличилось в 20 раз [3]. Однако избыточное поступление азота приводит к неэффективному использованию азотных удобрений и опасному загрязнению сельско-

хозяйственных и сопряженных с ними ландшафтов. В случае же недостаточного поступления азота происходит истощение почвы за счет ускоренной минерализации органического вещества. Установлено, что “средние величины потерь азота удобрения при выращивании сельскохозяйственных культур составляют 10–59% от применяемой дозы” [4]. Эффективность использования азотных удобрений в мире составляет в среднем 33% для зерновых культур, что указывает на существенный потенциал для ее улучшения посредством совершенствования технологий, прежде всего путем умеренного и эффективного применения азотных удобрений и правильного выбора сортов [3].

В то же время с увеличением доз азотных удобрений эффект последствия, обуславливающий рост доступности азота для последующих культур, возрастает, о чем свидетельствуют накопле-

ние N в почве и большие различия между эффективностью его использования в длительных и краткосрочных полевых опытах [5].

На современном этапе развития агрохимической науки при высоких дозах применения азотных удобрений важнейшей задачей является экологическая оценка их поведения в агроценозах. Анализ литературных данных показал, что для оценки экологической безопасности применения азотных удобрений и повышения эффективности использования азота применяют различные способы. В России используют такие показатели, как величина потребления азота, выражающаяся в абсолютных величинах на единицу площади или продукции, и коэффициент использования растениями азота удобрений [6]. Коэффициент использования растениями азота удобрений определяется в основном разностным методом и с использованием стабильного изотопа [4]. Изотопный метод дает более четкое представление об интенсивности поглощения растениями азота и эффективности азотных удобрений [6]. Однако практическое применение этого метода связано с определенными трудностями, поэтому исследователи более широко применяют коэффициент использования, определенный разностным методом.

В зарубежных публикациях эффективность азотных удобрений оценивают на основе комплекса показателей, требующих как данных контрольных вариантов полевых опытов (агрономическая эффективность, что практически соответствует отечественному показателю окупаемости; эффективность использования азота растениями), так и коэффициентов, позволяющих проводить сравнительные расчеты на основе статистических данных (например, урожайность и вынос урожая азота на единицу внесенного удобрения) [7].

В последнее время в зарубежных исследованиях многие авторы применяют показатель эффективности использования азота (*NUE*), основанный на принципе баланса массы [8–13] для определения экономически оправданных и при этом экологически безопасных доз азотных удобрений. *NUE* дает возможность количественно оценить долю внесенного азота, который использует культура.

Повышение *NUE*, а именно доли внесенного N в составе белковых соединений товарной продукции растениеводства, является одним из наиболее эффективных способов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур при одновременном снижении деградации, что учитывается при оценке продовольственной безопасности и качества окружающей среды [14].

NUE оказался удобен как показатель эффективности всей продовольственной системы, показывая отношение азота, доступного для потребления в пищу, от общего количества азота, используемого для производства этой пищи [15, 16]. В связи с этим *NUE* предложено использовать в качестве индикатора для оценки прогресса в достижении Целей устойчивого развития ООН [17]. В Российской Федерации данный показатель применяют в исследованиях экологической безопасности животноводческих хозяйств [18, 19].

Цель работы – апробация метода применения *NUE* для почвенно-климатических условий России на основе данных длительных и краткосрочных опытов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка эффективности использования азота культурами (*NUE*) основана на использовании 3-х индикаторов частичного баланса питательных веществ, а именно суммы поступления азота из основных источников (минеральных удобрений, навоза, пожнивных остатков, зеленого удобрения, биологической фиксации N и др.) и суммы его выноса из системы урожаем и побочной продукцией [8–10].

Отношение этих сумм является первым индикатором эффективности использования азота:

$$NUE, \% = \frac{\Sigma \text{выносов } N}{\Sigma \text{поступлений } N} \times 100;$$

Величины *NUE* должны интерпретироваться по отношению к 2-м другим индикаторам:

$$\text{избыток } N = \Sigma \text{поступлений } N - \Sigma \text{выносов } N \text{ (кг/га);}$$

$$\text{производительность (урожайность)} = \Sigma \text{выносов } N \text{ (кг/га).}$$

Авторы отмечают [8–10], что осаждение атмосферного N чаще всего игнорируется в расчетах, так как оно обычно мало по сравнению с сельскохозяйственными поступлениями.

Таким образом, *NUE* отражает долю азота, содержащегося в продуктах питания, в пределах описанной системы относительно количества N, поступающего в систему. *NUE* не учитывает и не описывает минерализацию, нитрификацию или другие пути преобразования N внутри системы и не является количественной оценкой потерь N системы.

В литературе отмечены особенности *NUE*, которые необходимо обязательно учитывать при его интерпретации [10]. Во-первых, сравнивать величины *NUE* для разных хозяйств нужно в соответ-

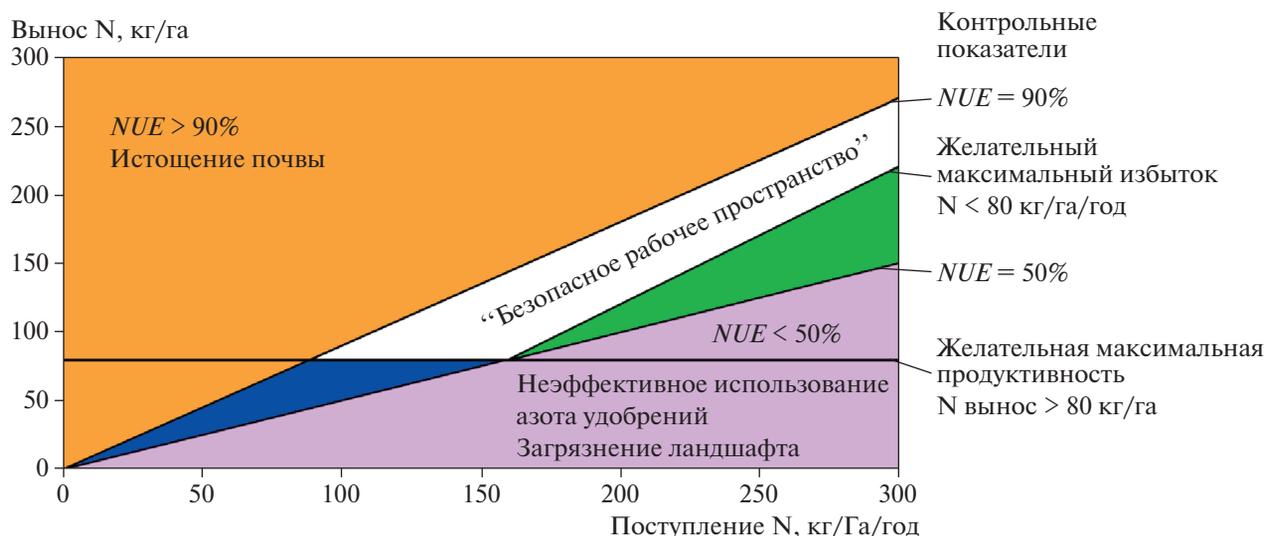


Рис. 1. Концептуальная структура комбинированной системы индикаторов NUE (приведено по [6, 7] с изменениями).

ствии с культурами. Различные виды культур могут иметь разные величины NUE , а национальные и региональные показатели NUE могут отражать конкретное сочетание систем сельского хозяйства в этих областях. Во-вторых, оценку NUE следует проводить в соответствии с севооборотами. В случае насыщенности севооборотов бобовыми травами или культурами, NUE необходимо рассчитывать на цикл ротации, чтобы учесть биологическую фиксацию N и N, вносимый бобовыми. Оценки данных величин можно найти в литературе [20]. В-третьих, смешанное использование территории под растениеводство и животноводство требует более сложного учета для оценки NUE . В данном случае вынос может включать в себя сельскохозяйственные продукты, которые вывозят и не используют полностью внутри хозяйства для корма, а также животноводческая продукция, включая любой навоз, который может быть вывезен, но не использован на месте. В этом случае внесение будет включать в себя минеральные удобрения, навоз, корма и кормовые добавки.

Кроме того, для хозяйства или государства одна величина NUE за один год не является исчерпывающе информативной. Оптимальной является оценка тенденции к изменению NUE с течением времени. В этом случае можно понять, будет ли достигнуто улучшение NUE в рамках данной системы земледелия, обусловленное климатом, почвами и хозяйственными условиями региона.

Несмотря на эти проблемы, все 3 индикатора: NUE , производительность и избыток N имеют важное значение для оценки наличия достаточ-

ного количества питательных веществ для получения высоких урожаев и для поддержания или даже улучшения состояния почвы.

Интерпретировать показатель NUE не сложно. Например, $NUE = 1$ показывает, что количество удаляемого из системы азота равно поступающему N. Это самый желательный вариант ведения хозяйства, когда все затраты на удобрения окупаются урожаем. $NUE > 1$ указывает на превышение выноса N урожаем над его поступлением. В этом случае при длительном сохранении такой ситуации происходит извлечение питательных веществ из почвы и истощение ее плодородия. $NUE < 1$ свидетельствует о том, что внесение N превосходит его вынос. Азот, не вынесенный в результате сбора урожая, может сохраняться в почве или удаляться из нее другими путями. Переход азота, поступившего с удобрениями, в запасы почвенного азота – процесс длительный и малоинтенсивный, поэтому низкие величины NUE указывают на большую вероятность вымывания его в грунтовые воды и загрязнение экосистемы.

Если поступление азота можно полностью контролировать, то его вынос определяется величиной урожая и уровнем содержания азота в нем, что зависит от многих условий, в частности, не поддающихся контролю, и по большей части связанных с погодными особенностями года, поэтому достичь $NUE = 1$ можно только при определенном стечении обстоятельств.

При графическом способе оценки эффективности сельскохозяйственного производства все 3 индикатора представлены на диаграмме поступления–выноса (рис. 1). Для этого всем 3-м индикатора

Таблица 1. Места проведения длительных опытов, вошедших в исследование

Учреждение	Область/рай-он	Год закладки опыта	Почва	Севооборот	Ссылка на электронный паспорт опыта
Костромской НИИСХ	Костромская обл., Костромской р-н	1978	Дерново-подзолистая	Зерно-пропашной	
Владимирский НИИСХ ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”	Владимирская обл., Суздальский р-н	1991	Дерново-подзолистая	Зерновой (полевой)	http://www.geoset.ru/ishop/2/227
ВНИИОУ ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”	Владимирская обл. Судогодский р-н	1968	Дерново-подзолистая	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	http://www.geoset.ru/ishop/2/130
Брянская ГСХА	Брянская обл., Выгоничский р-н	1983	Серая лесная	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	http://www.geoset.ru/ishop/2/154
Рязанский НИИСХ	Рязанская обл., Рязанский р-н	1992	Серая лесная	зерновой	http://www.geoset.ru/ishop/2/113
Белгородский НИИСХ	Белгородская обл., Белгород	1986	Чернозем	Зерно-травяной (полевой)	http://www.geoset.ru/ishop/2/149
Курский НИИ АПП	Курская обл., Курский р-н	1964	Чернозем	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	http://www.geoset.ru/ishop/2/137
Тамбовский НИИСХ	Тамбовская обл., Ржаксинский р-н	1971	Чернозем	Зерно-пропашной (полевой)	http://www.geoset.ru/ishop/2/221
ВНИИ сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова	Воронежская обл.	1935	Чернозем	Зерно-травяно-пропашной (полевой)	http://www.geoset.ru/ishop/2/138

торам присваивают определенные контрольные величины, т.е. желаемые и достижимые величины производительности (N выноса) – 80 кг/га, эффективности использования ресурсов (*NUE*) – от 50 до 90% и риска загрязнения окружающей среды (максимальный допустимый избыток N) – 80 кг/га. Величина контрольных величин зависит от почвы, климата и культуры.

В качестве примера на диаграмме величина N выноса дана как 80 кг/га, эффективность использования ресурсов (*NUE*) – от 50 до 90% и риск загрязнения окружающей среды (максимальный допустимый избыток N) – 80 кг/га.

Диапазон наилучшей эффективности использования азота располагается между *NUE* = 50 и 90%, более низкие величины (*NUE* < 50%) приводят к неоправданным затратам и загрязнению, а *NUE* > 90% в долгосрочной перспективе может привести к истощению почвы. Горизонтальная линия показывает желаемый минимальный уровень урожайности (черная область). Дополнительная диагональ определяет максимальный из-

быток азота, при котором возможно избежать его потери (темно-серая область). Контрольные величины служат для ограничения приоритетной области внесения азотных удобрений, или “безопасного рабочего пространства”, которая заключена между прямыми *NUE* = 90%, N вынос = 80 кг/га/год и N избыток = 80 кг/га/год (белая область). Показатели выносов азота урожаем, попадающие в эту зону, одновременно имеют высокую эффективность использования азота и высокую урожайность, при этом избыток N находится на низком уровне.

На основе оценки эффективности использования азота проведено исследование систем растениеводческого производства на основе урожайности озимой пшеницы по базам данных длительных и краткосрочных опытов агрохимслужбы и Геосети “Агрогеос” [21, 22]. В исследование включены длительные опыты, расположенные в Нечерноземной и Черноземной зонах Российской Федерации, охватывающие ареал распространения дерново-подзолистых, серых лесных

Таблица 2. Эффективность использования азота в длительных опытах Геосети в Нечерноземной зоне

Поступление N, кг/га	Урожайность, ц/га	Вынос N, кг/га	$NUE, N_{\text{вынос}} : N_{\text{поступление}}$	Избыток N, кг/га
0	4.8–35.2	30–90	–	–30...–90
30	11–34.1	40–93	1.25–2.74	–8...–59
40	39.6–66.7	108–129	2.70–3.23	–68...–89
50	32.3–40.9	69–130	1.33–2.60	–17...–80
60	12.1–26.8	42–75	0.66–1.17	–11...22
90	38.0–66.7	76–134	0.84–1.74	–59...14
100	19.3–36.6	81–131	0.65–1.26	–27...23
150	25.8–53.3	73–194	0.48–1.29	–44...59
200	37.7–49.8	83–102	0.4–0.49	106–125
250	43.8–68.2	123–134	0.5–0.54	114–125
300	41.9–59.2	110–118	0.37–0.39	182–190
350	45.4–69.9	126–139	0.36–0.40	211–224
400	43.6–59.2	111–122	0.28–0.31	278–289
450	44.1–69.1	125–135	0.28–0.29	315–325
500	50.0–72.6	147–151	0.29–0.30	349–353

почв и черноземов (табл. 1). Для Нечерноземной зоны обработаны данные 221 варианта опытов с озимой пшеницей за 12 лет исследований (2005–2016 гг.) с минеральной и органо-минеральной системами удобрения, обеспечивающими ежегодное внесение от 0 до 500 кг N/га и выносом от 29 до 179 кг N/га. Для Черноземной зоны обработаны 75 вариантов опытов с 2005 по 2015 гг. исследований с дозами удобрений от 0 до 300 кг N/га и выносом от 74 до 180 кг N/га.

Кроме того, в исследовании были использованы данные урожайности озимой пшеницы в 225 вариантах краткосрочных опытов из базы данных Агрохимслужбы и Геосети “Агрогеос”, расположенных на дерново-подзолистых почвах в Московской обл., за период 1972–1989 гг. [21, 22].

Проведена оценка 3-х индикаторов эффективности использования азота озимой пшеницей, результаты представлены в табличной и графической форме. Данные об урожайности пшеницы, побочной продукции и содержании азота в них пересчитаны в вынос азота урожаем (табл. 2).

Исследовали поступление N с удобрениями до дозы 150 кг/га для минеральной и до 500 кг/га – для органо-минеральной системы удобрения.

Низкие дозы азота (40 кг/га) (табл. 2) могут обеспечить относительно высокий урожай при

благоприятных погодных условиях, однако приводят к значительному дефициту азота в системе почва–растение. Баланс азота является дефицитным до доз N90. До дозы N60 вынос значительно превышает поступление, недостаток азота составляет 28–79 кг/га. Внесение до N100 приводит к некомпенсированному выносу азота из почвы растениями – $NUE > 90\%$. При поступлении N100 эффективность использования N приближается к единице, а после N150 поступление азота превышает вынос, эффективность использования азота становится значительно < 1 , с избытком 35–350 кг N/га. Внесение с удобрениями более 150 кг N/га создает избыток элемента, который не используется растениями на формирование урожая, а приводит к избыточному содержанию азота в почвах и сопредельных средах. Органо-минеральная система удобрения не обеспечивала ожидаемый рост урожайности при дозах азота более 250 кг/га. Очень высокие дозы азота, поступающие с навозом, производят очень большой избыток данного элемента в почве, но не катастрофического для окружающей среды, поскольку дозы > 150 кг N/га обеспечены внесением навоза, азот которого мало подвижен, сохраняется в почве и обеспечивает элементами питания следующие культуры в течение времени последствия.

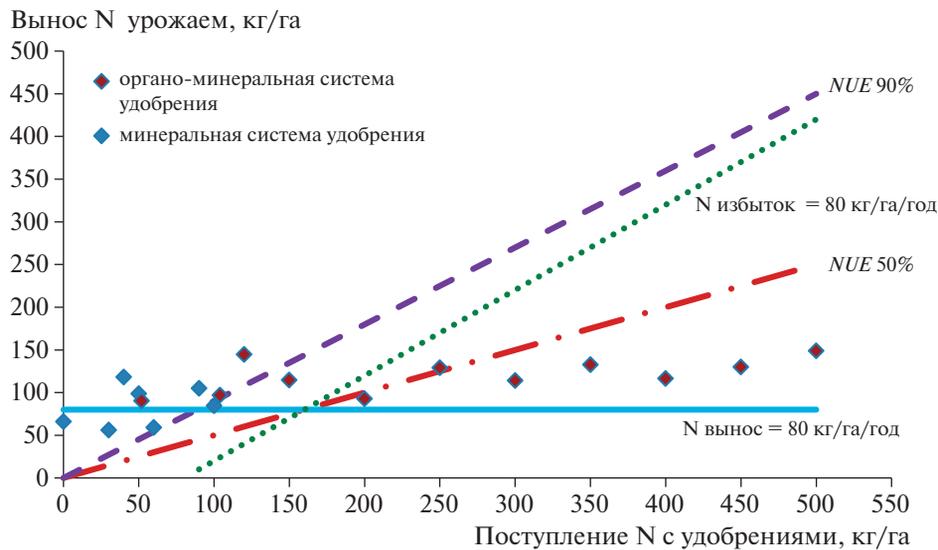


Рис. 2. Вынос азота урожаем озимой пшеницы в длительных опытах Геосети в Нечерноземной зоне РФ (2005–2016 гг.).

При применении $<N100$ неопределенность, создаваемая изменчивостью погодных условий, не позволяет достичь устойчивого управления азотным балансом. В диапазоне доз 100–150 кг N/га в минеральной и органо-минеральной системах удобрения в длительных опытах обеспечивается оптимальный баланс азота и наиболее полное использование внесенного азота растениями, при изменении урожайности в пределах 2.9–7.3 т/га и среднего содержания азота в продукции 2.0%.

Графический способ представления данных наглядно показывает, как производителю получить максимальный эффект от применения азотных удобрений и не нанести вреда агроландшафту.

Если представить данные в графической форме с усреднением по дозам и по годам, в длительных опытах, проведенных в Нечерноземной зоне на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, становится очевидно, что с некоторыми изменениями *NUE* снижается с повышением дозы азота, внесенного с удобрениями (рис. 2).

Величина *NUE*, значительно превышающая 90% при низких дозах применяемых удобрений, указывает на преимущественно почвенный источник N, поскольку она не могла быть обеспечена атмосферными выпадениями. Скорее всего, достаточная величина влажности дерново-подзолистых почв в течение вегетации озимой пшеницы способствует минерализации органического вещества почвы как источника N. Обращает внимание также значительная вариабельность этого показателя по годам исследования, связанная с зависимостью урожая от погодных условий и соответствующим изменением выноса N. Это ва-

риирование остается значительным (60–75 кг/га) для всех вариантов опытов, где доза удобрений является недостаточной для формирования урожая как в случае применения минеральной, так и органо-минеральной систем удобрения. Заметное снижение (20–25 кг/га) происходит при поступлении >100 кг N/га, т.е. при росте эффективности использования N удобрений. Ранее при анализе выборок длительных опытов, проводимых в Московской (26 лет) и Владимирской (15 лет) обл. было показано, что при дозах азотных удобрений <60 кг/га варьирование прибавки урожая озимой пшеницы и окупаемость N-удобрений определяются преимущественно влиянием погодных условий, а при дозах >90 кг N/га становятся сопоставимыми с влиянием окультуренности [23]. Проведенное исследование обнаруживает снижение варьирования эффективности доз N-удобрений по мере возрастания доз. Полученный результат согласуется также с исследованием эффективности использования N-удобрений в опыте Брудбалк, Ротамстед, где “безопасное рабочее пространство” достигалась при дозах N удобрений 100–200 кг N/га [10]. Вместе с тем, в отличие от опыта Брудбалк, где наблюдали междугодичный рост варьирования выноса N с увеличением доз, обратная зависимость для нашей выборки, по-видимому, отражает более универсальную роль роста эффективности использования N в стабилизации урожая, что делает перспективным усреднение результатов серии длительных опытов для оценки возможности увеличения устойчивости урожаев. Рост выноса N с ростом доз >50 кг N/га, достигающий в отдельные годы

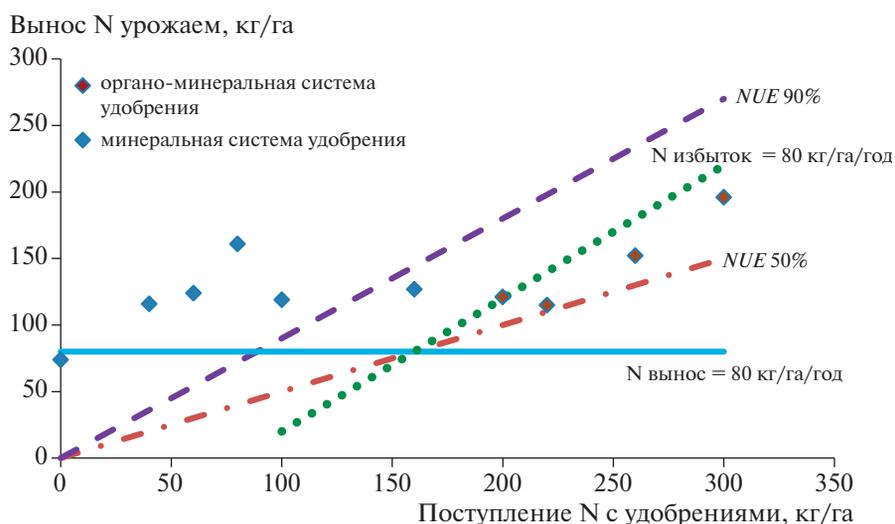


Рис. 3. Вынос азота урожаем озимой пшеницы в длительных опытах Черноземной зоны РФ (2005–2015 гг.).

максимальных величин 200 кг/га при дозе 150 кг/га, свидетельствует о возможности рассмотрения $NUE > 90\%$ как оптимальных в условиях значительной роли процессов минерализации в обеспечении запасов минерального N. Можно отметить, что при сравнении одинаковых доз вынос N в минеральных системах был больше, чем в органо-минеральных, что свидетельствует не только о меньшей доступности N, внесенного с органическими удобрениями в многолетнем ряду данных, но и о меньшем влиянии последствия внесенного органического N, что может быть результатом активной конкуренции микроорганизмов почвы за минерализуемый N.

Для усредненных по годам и дозам данных опытов в Черноземной зоне получено похожее распределение выносов азота по областям диаграммы (рис. 3). До количества 100 кг N/га из удобрений создание урожая происходит за счет запасов этого элемента в почве. В “безопасное рабочее пространство” попадают дозы удобрений 120–150 кг N/га. Более высокие дозы до 300 кг N/га, обеспеченные в опытах с органо-минеральной системой удобрения, попадают в область между избытком N 80 кг/га/год и $NUE = 50\%$, что показывает их небольшую, но неопасную избыточность.

В отличие от рассмотренных опытов в Нечерноземной зоне, где при дозе N < 60 кг/га вынос N в среднем был отмечен для большинства случаев на уровне 50 кг/га, в длительных опытах на черноземах вынос достигал 80 кг N/га в контрольных вариантах, что характеризует сравнительно более высокий уровень почвенного плодородия черноземов. Вместе с тем при росте доз значительного

увеличения выноса N не происходит, он стабилизируется на уровне 120–130 кг/га в широком диапазоне вариантов, что отражает влияние роста засушливости по сравнению с Нечерноземной зоной в снижении выноса N озимой пшеницей. Прирост выноса в минеральной системе удобрения составил 60 кг N/га при дозах N < 160 кг/га и 100 кг/га – в органо-минеральной системе при дозах N > 250 кг/га.

Вариабельность эффективности удобрений по годам исследования была выше наблюдаемой в Нечерноземной зоне (120–150 кг/га), возрастая с увеличением доз N. Таким образом, в условиях черноземов прием увеличения доз N-удобрений больше средних не приводит к стабилизации урожая, что выявляется при сравнении результатов длительных опытов в одном временном интервале. Значительное варьирование было обусловлено погодными условиями, особенно уменьшением урожаев в 2010 г. на 17–65% по сравнению с предыдущим годом для зернопроизводящих регионов Европейской территории России, что было связано с наиболее сильной за последние 60 лет атмосферной засухой [24].

Для краткосрочных опытов в Московской обл. обнаружены закономерности распределения выносов азота, несколько отличающиеся от современных длительных опытов (рис. 4): при наблюдаемой меньшей урожайности вынос N отмечен в пределах 100–130 кг/га при дозах N < 175 кг/га, в то время как в длительных опытах такая величина выноса обеспечивалась дозами > 100 кг/га. В то же время при дозе N < 60 кг/га вынос N в среднем оставался < 80 кг/га. В результате в рамки оптимальных величин попадают показатели выноса

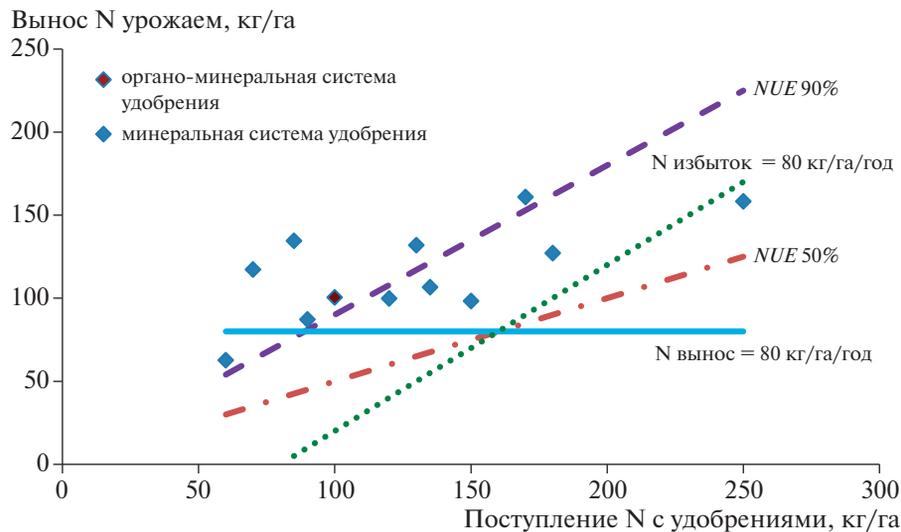


Рис. 4. Вынос азота урожаем озимой пшеницы в краткосрочных опытах в Московской обл. (1972–1989 гг.).

азота урожаем при внесении азота удобрений от 120 до 180 кг/га, эффективность внесения 240 кг N/га вызывает некоторый, но не опасный, его избыток в агроценозе. Данный диапазон достигался при варьировании урожайности 1.1–5.2 т/га и среднего содержания азота в продукции 2.26%.

Данные результаты свидетельствуют, что в условиях Нечерноземной зоны при возделывании озимой пшеницы “безопасное рабочее пространство” требует внесения 100–120 кг N/га для гарантированного предотвращения истощения почвы. В реальных условиях в зависимости от N-минерализующей способности почвы данные рекомендованные дозы могут снижаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа результатов длительных и краткосрочных опытов на территории Нечерноземной зоны РФ установлено, что наиболее сбалансированный результат относительно затрат на удобрения, отклика на них в виде урожая и безопасности для окружающей среды дают дозы азота при органо-минеральной системе удобрения – 100–150 кг N/га/год, при минеральной системе удобрения – 120–180 кг N/га/год. Для Нечерноземной зоны эффективность использования азота озимой пшеницей при более низких дозах может превышать 90% при значительной роли процессов минерализации в обеспечении запасов минерального N. Для длительных опытов на черноземных почвах безопасной дозой является 120–150 кг N/га/год. При сравнении одинаковых доз вынос N в минеральных системах был больше по сравнению с органо-минеральными

как в опытах на черноземах, так и в Нечерноземной зоне.

Предложенная система индикаторов азотного питания растений и ее графическая форма представления позволяет одновременно оценить способ ведения сельскохозяйственного производства по 3-м важным параметрам: эффективности использования азота, величине урожайности и влиянию на окружающую среду. Различные дозы внесения азотных удобрений, применяемые в длительных и краткосрочных опытах под озимую пшеницу, показали, что неблагоприятные последствия могут быть вызваны как слишком низкими, так и слишком высокими дозами азота. Добиться более рационального использования азотных удобрений и устойчивого развития хозяйства можно с помощью прогрессивных методов ведения сельского хозяйства, таких, как точное земледелие, севооборот и тестирование азотного питания во время вегетации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудяров В.Н. Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // *Агрохимия*. 2018. № 10. С. 3–11.
2. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П. *Агрохимия. Учебник* / Под ред. Минеева В.Г. М.: ВНИИА, 2017. 854 с.
3. Verhulst N., Francois I., Grahmann K., Cox R., Govaerts B. Nitrogen use efficiency and optimization of nitrogen fertilization in conservation agriculture // *CAB Reviews*. 2013. V. 8. № 053. P. 1–19. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20138053>
4. Завалин А.А., Соколов О.А. Поток азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 596 с.

5. *Castellano M.J., David M.B.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils is not necessarily related to nitrate leaching from agricultural soils // *Proceed. National Acad. Sci. USA (PNAS)*. 2014. V. 111(8). E766. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321350111>
6. *Завалин А.А., Соколов О.А.* Коэффициент использования растениями азота удобрений и его регулирование // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2019. № 4(370). С. 71–75. <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-14070>
7. *4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, Metric Version / Ed. Bruulsema W., Fixen P.E., Sulewski G.D.* Norcross, GA, USA: International Plant Nutrition Institute, 2012. 150 p.
8. *Norton R., Davidson E., Roberts T.* Nitrogen use efficiency and nutrient performance indicators. GPNM Task Team Report and Recommendations. Technical Paper. 2015. 14 p. https://mafiadoc.com/nitrogen-use-efficiency-and-nutrient-performance-indicators-gpnm-_59b1e9551723ddd7c686d684.html
9. *Brentrup F., Lammel J.* Nitrogen Use Efficiency, Nitrogen balance, and Nitrogen productivity – a combined indicator system to evaluate Nitrogen use in crop production systems. Proceedings of the 2016 International Nitrogen Initiative Conference, “Solutions to improve nitrogen use efficiency for the world”, 4–8 December 2016, Melbourne, Australia, www.ini2016.com
10. EU Nitrogen Expert Panel. Nitrogen Use Efficiency (NUE) – an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems. Wageningen University, 2015. Alterra, PO Box 47, NL-6700 Wageningen, Netherlands.
11. *Sutton M.A., Bleeker A., Howard C.M.* Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. UK, Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology, 2013. 128 p.
12. *Dobermann A.* Nutrient use efficiency – measurement and management // *Fertilizer best management practices. General principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices.* 2007. Brussels, Belgium, P. 1–28.
13. *Omara P., Aula L., Oyebiyi F., Raun W.R.* World Cereal Nitrogen Use Efficiency Trends: Review and Current Knowledge // *Agrosyst. Geosci. Environ.* 2019. 2:180045. <https://doi.org/10.2134/age2018.10.0045>
14. *Zhang X., Davidson E.A., Mauzerall D.L., Searchinger T.D., Dumas P., Shen Y.* Managing nitrogen for sustainable development // *Nature*. 2015. V. 528 (7580). P. 51–59. DOI: hal-01262089 <https://doi.org/10.1038/nature15743>
15. *Erismann J.W., Leach A., Bleeker A., Atwell B., Cattaneo L., Galloway J.* An integrated approach to a nitrogen use efficiency (NUE) indicator for the food production-consumption chain // *Sustainability (Switzerland)*. 2018. V. 10 (4). P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/su10040925>
16. *Isermann K., Isermann R.* Food production and consumption in Germany: N flows and N emissions // *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 1998. V. 52. P. 289–301. <https://doi.org/10.1023/A:1009706001900>
17. The Sustainable Development Goals Report. UN. 2019. N.Y., <https://doi.org/10.18356/55eb9109-en>
18. *Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Обломкова Н.С.* Методика оценки экологической устойчивости сельских территорий // *Технол. и техн. средства мех. произв-ва продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 3 (96). С. 164–175. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10070>
19. *Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Козлова Н.П., Обломкова Н.С.* Система показателей машинных технологий для достижения экологической устойчивости сельских территорий при производстве животноводческой продукции // *Технол. и техн. средства мех. произв-ва продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 3 (96). С. 156–163.
20. *Salvagiotti F., Cassman K.G., Specht J.E., Walters D.T., Weiss A.* Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review // *Field Crops Res.* 2008. V. 108. P. 1–13.
21. *Рухович О.В., Беличенко М.В., Романенков В.А., Никитина Л.В., Листова М.П., Шевцова Л.К., Хайдуков К.П., Чистотин М.В., Беляева Н.К.* База данных длительных опытов Геосети по урожайности сельскохозяйственных культур качеству земель в Центральном федеральном округе (дерново-подзолистые почвы) Свид-во о регистрации базы данных RU 2015621414, 15.09.2015. Заяв. № 2015621050 от 06.08.2015.
22. *Рухович О.В., Беличенко М.В., Романенков В.А., Никитина Л.В., Листова М.П., Шевцова Л.К., Хайдуков К.П., Чистотин М.В., Беляева Н.К.* База данных длительных опытов Геосети по урожайности сельскохозяйственных культур и качеству земель в Центральном федеральном округе (черноземы и серые лесные почвы) Свид-во о регистрации базы данных RU 2015621610, 29.10.2015. Заяв. № 2015621051 от 06.08.2015.
23. *Сиротенко О.Д., Романенков В.А., Павлова В.Н., Листова М.П.* Оценка и прогноз эффективности минеральных удобрений в условиях изменяющегося климата // *Агрохимия*. 2008. № 7. С. 26–33.
24. *Фролов А.В., Страшная А.И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // *Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года: Сб. тр. М.: Триада ЛТД*, 2011. С. 22–31.

Nitrogen Use Efficiency in Long-Term and Short-Term Experiments in the Russian Federation

V. A. Romanenkov^{a,b}, M. V. Belichenko^{b,#}, O. V. Rukhovich^b, L. V. Nikitina^b, and O. I. Ivanova^b

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science
Leninskie Gory 1, bld. 12, GSP-1, 119991 Moscow, Russia*

^b *D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31A, Moscow 127550, Russia*

[#] *E-mail: mvbelichenko@gmail.com*

A study of the Nitrogen Use Efficiency (*NUE*) in winter wheat was carried out using a combined set of nitrogen crop nutrition indicators. For the study the databases of long-term and short-term experiments with fertilizers located in the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation and in the Moscow Region on sod-podzolic soils and in the Chernozem Zone on chernozems were used. The results of short-term trials in 1972–1989 and long-term experiments in 2005–2016 were compared. It was found that the optimal nitrogen balance and the most efficient use of fertilizer by crops is ensured by nitrogen rates in the range of 100–150 kg ha⁻¹ · year⁻¹ in long-term experiments and 120–180 kg · ha⁻¹ in short-term experiments for sod-podzolic soils, 120–150 kg ha⁻¹ for chernozems in the mineral and organic-mineral fertilizer system. Lower nitrogen rates cause the instability of uptake due to the significant crop-weather dependence and can lead to soil mining; higher rates are potentially dangerous as a source of nitrogen pollution of agrocenoses. A decrease in N uptake variability for higher rates may reflect the prospect of averaging the results of a series of long-term experiments to assess the possibility of managing yield sustainability with this approach.

Key words: long-term and short-term experiments, nitrogen fertilizers, Nitrogen Use Efficiency (*NUE*).

УДК 632.51:631.963

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕР БОРЬБЫ С СОРНЯКАМИ В СЕВООБОРОТЕ НА ЗАСОРЕННОСТЬ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ПОЛЯ

© 2020 г. Ю. Я. Спиридонов^{1,*}, Н. И. Будынков¹, И. В. Дудкин^{2,**},
Н. И. Стрижков^{3,***}, Н. Б. Суминова^{4,****}

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

² Курский научно-исследовательский институт агропромышленного производства
305526 Курская обл., Курский р-н, п. Черемушки, Россия

³ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Юго-Востока
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия

⁴ Саратовский государственный аграрный университет
им. Н.И. Вавилова 410012, Саратов, Театральная пл., 1, Россия

*E-mail: spiridonov@vniif.ru

**E-mail: kniiapp@mail.ru

***E-mail: raiser-saratov@mail.ru

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

Поступила в редакцию 14.04.2020 г.

После доработки 12.05.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

Приведены результаты изучения последствий удобрений и препаратов, используемых в борьбе с сорными растениями в посевах предшественников, на снижение засоренности заключительного поля севооборота — в посевах ячменя.

Ключевые слова: ячмень, минеральные удобрения, комплексные приемы, агротехнические приемы, сорняки.

DOI: 10.31857/S0002188120120108

ВВЕДЕНИЕ

Анализ данных отечественных и зарубежных исследований показывает, что с периода прорастания и до конца вегетационного периода культуры и сорняки оказывают взаимное влияние друг на друга. Степень этого воздействия в значительной степени зависит как от биологической особенности культуры, так и от массы и количества сорных растений в фитоценозе, плодородия почвы, минерального питания и погодных условий как текущего года, так и предшествующих лет.

Все агротехнические мероприятия должны быть направлены на создание наиболее благоприятных условий для развития и роста культурных растений, начиная от ранних фаз и в течение всего периода вегетации [1–5]. В первую очередь к ним относится борьба с вредными организмами в посевах [6–11]. Несоблюдение данного требования приводит к резкому снижению урожайности [12–20]. В связи с этим разработка различных мер борьбы с сорняками в посевах возделываемых

культур является актуальной проблемой, от решения которой зависит стабильность получаемых урожаев.

Цель работы — изучение последствий примененных мер борьбы с сорняками в 8-польном зернопаропропашном севообороте на сорный компонент и урожайность заключительного поля ячменя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыты были заложены в НИИСХ “Юго-Востока” в 2002–2016 гг. Почва — южный чернозем тяжелосуглинистый с содержанием гумуса 4.56%. Исследования были проведены в многолетнем стационарном 8-польном зернопропашном севообороте, развернуты во времени и пространстве со следующим чередованием культур: чистый пар — озимая пшеница — твердая яровая пшеница — бобовые (нут) — мягкая яровая пшеница — просо — пропашные культуры (подсолнечник, кукуруза) —

Таблица 1. Влияние комплексного применения разных приемов борьбы с сорняками и удобрений на засоренность ячменя (заключительное поле)

Вариант	Количество сорняков, шт./м ²					
	при полных всходах			перед уборкой		
	всего	в т.ч.		всего	многолетние	однолетние
многолетние		однолетние				
без удобрений						
Агротехнические приемы	163	34.8	128	102	27.2	75.1
Первая система	39.1	69.0	31.0	40.4	62.5	32.4
Вторая система	36.6	73.0	26.7	37.6	68.0	26.6
Третья система	18.6	64.4	6.2	33.7	60.3	24.1
Удобренный фон						
Агротехнические приемы	175.8	27.4	148.4	105.9	28.1	77.8
Первая система	39.6	55.8	36.6	43.6	64.8	36.0
Вторая система	34.8	65.7	29.2	37.8	69.0	26.5
Третья система	26.9	60.2	20.8	35.3	63.3	25.2

Примечания. 1. В контроле приведена численность сорняков (шт./м²), в остальных вариантах – их гибель (% от контроля). 2. Агротехнические приемы – контроль без гербицидов, первая система защиты – фронтьер 1.25 л/га + аминопелик 1.3 л/га, вторая система – фронтьер 1.5 л/га + аминопелик 1.2 л/га, третья система – аминопелик 1.6 л/га (эталон). То же в табл. 3–5.

заключительное поле (ячмень, овес). В заключительном поле высевали ячмень сорта Нутанс 187.

Площадь учетной делянки – 252 м², повторность четырехкратная, на одну половину делянки вносили рекомендованные дозы удобрений, на другую – нет, гербицидами обрабатывали всю делянку.

В опыте изучали последствие в 4-х вариантах. В варианте 1 в посеве предшественника (кукурузы) химическую прополку не проводили, сорные растения подавляли агротехническими приемами (контроль без обработки гербицидами). В вариантах 2 и 3 на фоне агротехнических приемов применяли первую и вторую системы защиты (препарат фронтьер с нормами расхода 1.25 и 1.5 л/га и препарат аминопелик – 1.3 и 1.2 л/га соответственно), в варианте 4 – третью систему защиты – препарат аминопелик 1.6 л/га (эталон).

Весь период исследований разбили на группы лет: сухие годы – за май–июль выпало всего 81 мм осадков, за год 399 мм; средние годы – за май–июль выпало 129 мм, 434 мм за весь год; благоприятные годы – за май–июль выпало 184 мм осадков, за весь год 584 мм. Среднемноголетняя сумма осадков составила за май–июль 139 мм, или 451 мм за год.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гербициды, примененные в посеве предшественника ячменя, способствовали значительному снижению засоренности посевов. При систематическом применении гербицидов было значительно меньше всех групп сорняков, что можно объяснить проявлением последствия на сорные растения за прошлые годы. Погодные условия наложили также отпечаток на засоренность посевов заключительного поля: при исходном учете в благоприятные годы она составила 245, в средние – 138, в сухие только – 88.2 шт./м² или в 1.78 и 2.78 раза меньше, чем во влажные.

Минеральные удобрения в последствии, как правило, провоцировали к прорастанию большее количество сорняков как в сухие, так и во влажные годы на 3.3–9.6%, за весь период исследований – на 7.8%. Засоренность на удобренном фоне составила 163, на удобренном – 176 шт./м² (табл. 1).

Перед уборкой количество многолетних сорняков в сухие годы сократилось на 7.9, однолетних – на 70.3% и составило 45.9, во влажные – 118 шт./м² (табл. 2). Масса сорных растений в сухие годы достигла максимальной величины 905 г/м² из них 875 – многолетники и всего 29.1 г/м² – однолетники. Во влажные и средние годы масса сорных растений была равна 544 и 541 г/м², из них

Таблица 2. Влияние комплексного применения разных приемов борьбы с сорняками и удобрений на засоренность ячменя в разные по влагообеспеченности годы

Вариант	Условия увлажнения, годы опыта									Среднее		
	сухие			средние			благоприятные					
	всего	много-летние	одно-летние	всего	много-летние	одно-летние	всего	много-летние	одно-летние	всего	много-летние	одно-летние
Без удобрений												
Агротехнические методы (контроль)	45.9	29.1	16.8	170	23.9	146	118	27.4	90.6	102	27.2	75.1
Первая система	<u>23.8</u> 48.1	<u>7.4</u> 74.6	<u>16.4</u> 2.4	<u>107</u> 37.1	<u>11.6</u> 51.5	<u>95.3</u> 34.6	<u>70.7</u> 40.1	<u>12.0</u> 56.2	<u>58.7</u> 35.6	<u>61.0</u> 40.4	<u>10.2</u> 62.5	<u>50.8</u> 32.4
Вторая система	<u>17.3</u> 62.3	<u>11.6</u> 31.1	<u>11.6</u> 31.1	<u>118</u> 30.5	<u>7.4</u> 69.0	<u>111</u> 24.1	<u>77.4</u> 34.4	<u>12.3</u> 55.1	<u>65.1</u> 28.1	<u>63.8</u> 37.6	<u>87</u> 68.0	<u>55.1</u> 26.6
Третья система	<u>21.5</u> 53.2	<u>10.6</u> 36.9	<u>10.6</u> 36.9	<u>123</u> 27.3	<u>10.7</u> 55.2	<u>113</u> 22.8	<u>80.6</u> 31.7	<u>10.8</u> 60.6	<u>69.8</u> 23.9	<u>67.8</u> 33.7	<u>10.8</u> 60.3	<u>57.0</u> 24.1

Примечания: 1. Над чертой – шт./м², под чертой – % гибели. 2. НСР₀₅ фон = 21 шт./м², НСР₀₅ системы = 30 шт./м², НСР₀₅ взаимодействие фон×система = 42 шт./м².

Таблица 3. Влияние комплексного применения агротехнических приемов, гербицидов и удобрений на снижение массы сорняков под посевами ячменя в разные по влагообеспеченности годы

Вариант	Условия увлажнения, годы опыта									Среднее		
	сухие			средние			благоприятные					
	всего	много-летние	одно-летние	всего	много-летние	одно-летние	всего	много-летние	одно-летние	всего	много-летние	одно-летние
Без удобрений												
Агротехнические приемы (контроль)	905	875	29.1	541	379	162	544	483	60.4	676	606	70.2
Первый комплекс **	<u>238</u> 73.7	<u>149</u> 82.9	<u>88.3</u> +203	<u>376</u> 30.5	<u>248</u> 34.6	<u>128</u> 20.7	<u>247</u> 51.3	<u>213.6</u> 55.8	<u>51.0</u> 15.6	<u>278.1</u> 58.9	<u>197.1</u> 67.5	<u>81.0</u> +15.4
Второй комплекс	<u>161</u> 82.2	<u>120</u> 86.3	<u>40.6</u> +39.5	<u>196</u> 63.7	<u>76.6</u> 79.8	<u>119</u> 26.1	<u>305</u> 43.8	<u>233.0</u> 51.8	<u>72.3</u> +19.7	<u>229.0</u> 66.1	<u>158.4</u> 73.8	<u>70.6</u> +0.6
Третий комплекс	<u>254</u> 71.9	<u>204</u> 76.7	<u>50.6</u> +73.9	<u>234</u> 56.6	<u>101</u> 73.3	<u>133</u> 17.7	<u>277.7</u> 48.9	<u>194.1</u> 59.8	<u>83.6</u> 38.4	<u>260.0</u> 61.5	<u>178.1</u> 70.6	<u>81.9</u> +16.7

Примечания: 1. Над чертой – г/м², под чертой – % их гибели. 2. НСР₀₅ фон = 35 г/м², НСР₀₅ системы = 134 г/м², НСР₀₅ взаимодействие фон × система = 190 г/м².

на долю многолетних приходилось 88.9 и 70.1% от общей массы, в сухие – 96.8% (табл. 3). Масса однолетних сорняков в благоприятные годы была в 2 раза больше, чем в сухие.

Показано, что в засушливые годы формировался сорный фитоценоз, состоящий преимущественно из многолетних сорняков. Их доля составляла 63.4%, а в средние и влажные годы – 14.1 и 23.2% соответственно. В средние и влажные годы в посевах по численности преобладали одно-

летние виды, по массе во все периоды исследования доминировали корнеотпрысковые сорняки, особенно в засушливые годы. При систематическом применении гербицидов было значительно меньше сорняков, что можно объяснить проявлением последствия на сорные растения за прошлые годы.

Использование почвенных гербицидов в посевах предшественников позволило снизить конкуренцию между сорняками и культурой за основ-

ные факторы роста и развития уже в начале вегетации. Почвенные гербициды во всех изучаемых вариантах в последствии привели к сокращению численности однолетних сорных растений. В благоприятные годы их положительное действие было более значительным. При оптимальной влажности почвы происходило более полное раскрытие технических свойств препаратов. В последствии засоренность посевов на неудобренном фоне при исходном учете при внесении экспериментальных препаратов снизилась на 34.2–46.2%, при внесении эталона – на 27.4%, на удобренном фоне – соответственно на 38.9–47.6 и 30.1%.

В средние по влагообеспеченности годы на удобренном фоне засоренность однолетниками увеличилась на 18.4–33.8%. Число сорняков при использовании гербицидов группы 2,4-Д возросло на 24.8–31.6%. Засоренность посевов при использовании экспериментальных препаратов в засушливые годы была меньше, чем в благоприятные годы. Гибель однолетников в последствии составила при внесении гербицидов 31.6–39.9, эталона – 12.2%.

В среднем за годы исследования количество однолетних сорняков, оставшихся после применения препаратов на удобренном фоне, не превышало 64.0–71.0%, при внесении эталона – 80% по отношению к контролю. Препараты, примененные на удобренном фоне в последствии, обладали большей токсичностью, чем на неудобренном. Применение послевсходовых гербицидов в посевах кукурузы и других предшественников резко снизило засоренность корнеотпрысковыми сорняками. На уровень засоренности сказалось также последствие комплексного применения гербицидов и агротехнических методов борьбы с сорняками в предшествующие годы. Почвенные гербициды усиливали действие послевсходовых. Количество многолетних сорняков в сухие годы сократилось на 68.0–77.2%. В средние и благоприятные годы техническая эффективность препаратов не превышала 71.3%.

Общая засоренность посевов ячменя к уборке при применении комплекса гербицидов в посевах предшественников составляла не более 38–52, эталона – 47% в сухие годы, во влажные годы засоренность посевов была значительно больше – 60.0–65.6%, в средние годы – 63.0–70.0. Аналогичная закономерность прослежена и при применении эталона. Его эффективность была меньше, чем у препаратов, использованных в опыте (табл. 2). При применении комплекса гербицидов в последствии масса сорняков была в 3.8–5.6 раза меньшей, чем в контроле в сухие годы, в средние

годы – в 1.43–2.75 раза, во влажные – в 1.78–2.06 раза.

Также в вариантах применения гербицидов произошло изменение соотношения разных биологических групп сорняков. Если в контроле в сухие годы преобладали многолетники (63.4%), то доля однолетников составила 36.6%. Под влиянием гербицидов, примененных ранее, доля многолетних сорняков составила 31.1–32.9, однолетних – 67.1–68.9%. При применении эталона они были представлены в равных долях. Во влажные годы в контроле многолетние виды занимали 23.2, однолетние – 76.8%. Препараты уменьшили количество корнеотпрысковых видов и их долю в фитоценозе до 15.9–17.0%, при этом возросла доля однолетников до 83.0–84.1%. В средние годы из всех сорняков многолетние корнеотпрысковые сорняки составляли 14.1, однолетние – 85.9%, гербициды уменьшили численность и их долю в фитоценозе до 6.3–10.9%.

В среднем за годы исследования применение гербицидов позволило в последствии снизить засоренность посева на 36.6–39.1% по сравнению с контролем. К концу вегетационного периода эффективность применения всех систем гербицидов снизилась. Под влиянием удобрений общая численность сорняков возросла на 3.5%. Удобрения несколько усиливали токсичность препаратов с 33.7–40.4 до 35.3–43.5%. Масса сорных растений к уборке под влиянием препаратов сократилась на 58.9–66.1%. В последствии удобрения снизили массу сорняков на 7.9%.

Примененные различные системы защиты в посевах предшественников изменили соотношения групп сорняков. Снизилась доля многолетних сорняков с 28.4 в контроле до 13.3–15.0% в опытных вариантах. Под влиянием удобрений количество многолетних сорняков возросло на 3.6%, а их доля сократилась, но увеличилась засоренность однолетниками. Сорняки, сохранившие жизнеспособность, находились в угнетенном состоянии, о чем свидетельствовала их низкая биомасса. Средняя масса одного многолетнего сорного растения на участках, где применяли в посевах предшественников гербициды, составила 18.9 г, в контроле – 20.5 г, на удобренном фоне – 16.7 и 19.1 г соответственно, т.е. показатели уменьшились на 7.8 и 12.6%.

В посевах ячменя, в заключительном поле сорняки проявляли в засушливые годы наибольшую вредоносность. Снижение урожайности культуры составило 3.2–6.7 кг/га (0.59–1.24%) в пересчете на одно сорное растение (табл. 4).

Таблица 4. Изменение урожайности в посевах ячменя (заключительное поле) в зависимости от численности сорняков

Вариант	Урожайность			Сорняки			Снижение на 1 сорняк	
	кг/га	прибавки		всего, шт./м ²	состав, %		кг	%
		кг/га	%		многолетние	однолетние		
Без удобрений								
Сухие годы								
Агротехнические приемы (контроль)	535			45.9	63.4	36.4		
Первая система	682	147	27.5	23.8	31.1	68.9	6.65	1.24
Вторая система	625	90	16.8	17.3	32.9	67.1	3.15	0.59
Третья система	628	93	17.4	21.5	50.7	49.3	3.81	0.71
Средние годы								
Агротехнические приемы (контроль)	2210			170	14.1	85.9		
Первая система	2280	70	3.2	107	10.9	89.1	1.11	0.05
Вторая система	2140	-79	-3.6	118	6.3	93.7		
Третья система	2510	291	13.1	123	8.7	91.3	6.27	0.28
Благоприятные годы								
Агротехнические приемы (контроль)	1910			170	23.2	76.8		
Первая система	2020	106	5.5	107	17.0	83.0	2.24	0.12
Вторая система	1900	-6	-3.6	118	15.9	84.1		
Третья система	1970	60	13.1	123	13.4	86.6	1.60	0.08
Средние годы								
Агротехнические приемы (контроль)	1470			102	26.6	73.4		
Первая система	1580	114	7.8	61.0	16.7	83.3	2.76	0.19
Вторая система	1480	14	1.0	63.8	13.6	86.4	0.36	0.02
Третья система	1590	121	8.2	67.8	15.9	84.1	3.51	0.24

Таблица 5. Изменение урожайности ячменя в посевах заключительного поля севооборота в зависимости от массы сорняков

Вариант	Урожайность			Сорняки			Снижение урожайности на 1 г сорняка	
	ц/га	прибавки		всего, г/м ²	состав в %		кг	%
		ц/га	%		многолетние	однолетние		
Среднее								
Агротехнические приемы (контроль)	147			676	89.6	10.4		
Первая система	158	11	7.8	278	70.9	29.1	0.29	0.02
Вторая система	148	1	1.0	229	69.2	30.8	0.03	0.002
Третья система	159	12	8.2	260	68.5	31.5	0.29	0.02

Потери в средние годы равнялись 1.1–6.3 кг (0.05–0.28%) а в благоприятные 1.6–2.2 кг/сорное растение (0.08–0.12%), что по сравнению с засушливыми годами было в 7–10 раз меньше. Приме-

нение удобрений снижало вредоносность сорняков более сильно в сухие годы с 0.59–1.24% до 0.47–0.53%, а во влажные несколько увеличило с 0.08–0.12 до 0.13–0.14%. Снижение урожайности

на 1 г вегетативной массы сорных растений показало, что наиболее вредоносными были сорняки в засушливые годы: уменьшение урожайности составило от 0.02 до 0.04%/г сорного растения, в благоприятные годы – 0.01–0.02%. При применении удобрений вредоносность 1 г сорной растительности снижалась в средние годы, в сухие оставалась на прежнем уровне, во влажные годы – повышалась (табл. 5).

За годы исследования удельная вредоносность одного сорного растения составила 0.36–3.51 кг/га (0.02–0.24%). Удобрения уменьшали вредоносность до 2.1–3.21 кг/га (0.14–0.21%), вредоносность 1 г вегетативной массы – до 0.03–0.29 кг/га (0.002–0.02%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение гербицидов в посевах предшественников ячменя (в заключительном поле севооборота) приводило к значительному снижению засоренности по сравнению с одними агротехническими приемами. Эффективность гербицидов на удобренном фоне была выше, чем на неудобренном. Из испытанных препаратов наибольшей технической эффективностью обладала система гербицидов, состоящая из почвенных и послевсходовых гербицидов, используемых в минимальной дозировке по сравнению с эталонным препаратом аминопелик, использованном в максимальной норме расхода. В отличие от эталона комплексное применение гербицидов действовало не только на двудольные сорняки, но и на однолетние злаковые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikolaichenko N.V.* Productivity of nontraditional medicinal and forage crops in the conditions of dry steppe of the Volga region // *Inter. J. Adv. Biotechnol. Res.* 2019. Т. 10. № 2. С. 384–391.
2. *Nikolaichenko N.V., Eskov I.D., Muraveva M.V., Strizhkov N.I., Azizov Z.M.* Influence of the seeding rate, sowing methods and disease and pest control measures on the yield and quality of seeds for different varieties of milk thistle // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2017. Т. 9. № 11. С. 2263–2268.
3. *Nikolaichenko N.V., Eskov I.D., Muraveva M.V., Strizhkov N.I., Azizov Z.M.* Productivity and plant protection from diseases and pests of milk thistle (variety amulet) in chernozems in the steppe zone of the Volga region // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2017. Т. 9. № 7. С. 1164–1168.
4. *Nikolaichenko N.V., Eskov I.D., Druzhkin A.F., Shyurova N.A., Kishnikatina A.N., Strizhkov N.I.* Yield, oil content and biochemical composition of seeds of milk thistle, depending on the methods of soil cultivation in the Volga region steppe zone // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2018. Т. 10. № 1. С. 223–227.
5. *Strizhkov N.I., Azizov Z.M., Suminova N.B., Eskov I.D., Nikolaichenko N.V., Molchanova A.V.* The effect of the sowing methods and the seeding rate on the yield of nicandra physalodes biomass in single-species and mixed with sugar sorghum phytocenoses in the steppe zone of the Volga region // *J. Pharmaceut. Sci. Res.* 2018. Т. 10. № 4. С. 323–329.
6. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Сайфуллина Л.Б., Ленович Д.Р., Султанов А.С.* Последствие гербицидов и динамика их разложения в различных агроландшафтах // *Аграр. науч. журн.* 2019. № 4. С. 27–31.
7. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Дудкин И.В., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Курасова Л.Г., Даулетов М.А.* Распределение вредных организмов по различным элементам рельефа и агроландшафта // *Аграр. науч. журн.* 2018. № 6. С. 16–20.
8. *Каменченко С.Е., Стрижков Н.И., Наумова Т.В.* Эколого-биоценотические закономерности размножения лугового мотылька в агроценозах Нижнего Поволжья // *Земледелие.* 2013. № 3. С. 37–39.
9. *Каменченко С.Е., Стрижков Н.И., Наумова Т.В.* Вредоносность остроголовых клопов на зерновых культурах в Поволжье // *Земледелие.* 2015. № 2. С. 37–38.
10. *Каменченко С.Е., Стрижков Н.И., Наумова Т.В.* Факторы, влияющие на динамику популяций вредных саранчовых в Нижнем Поволжье // *Земледелие.* 2012. № 1. С. 41–43.
11. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Дудкин И.В., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Николайченко Н.В., Даулетов М.А., Ленович Д.Р.* Взаимодействие культурных растений и вредных объектов в агрофитоценозах // *Аграр. науч. журн.* 2018. № 7. С. 26–30.
12. *Лебедев В.Б., Стрижков Н.И.* Основные направления борьбы с пыреем ползучим // *Достиж. науки и техн. АПК.* 2007. № 8. С. 30–31.
13. *Стрижков Н.И.* Экологически обоснованные минимально необходимые нормы и сроки применения гербицидов на полевых культурах // *Достиж. науки и техн. АПК.* 2007. № 9. С. 19–20.
14. *Стрижков Н.И., Лебедев В.Б., Каменченко С.Е., Долгополов Ю.И., Якушева Л.Д., Власенко Г.И.* Влияние различных факторов на формирование видового состава сорняков и уровень засоренности культур в севооборотах Поволжья // *Достиж. науки и техн. АПК.* 2010. № 5. С. 15–17.
15. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Николайченко Н.В., Ленович Д.Р.* Оптимальные нормы применения перспективных химических средств защиты растений для склоновых агроландшафтов // *Аграр. науч. журн.* 2019. № 6. С. 32–37.
16. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Атаев С.С.Х., Суминова Н.Б., Даулетов М.А., Ленович Д.Р.* Разработка интегрированной технологии защиты посевов полевых культур от болезней, вредителей и сорняков на основе биологических и химических методов // *Аграр. науч. журн.* 2017. № 9. С. 37–42.
17. *Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Даулетов М.А.*

- Применение препарата Гермес при возделывании подсолнечника // АПК России. 2017. Т. 24. № 2. С. 303–307.
18. Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Критская Е.Е. Возделывание льна с применением Секатора Турбо, Фуроре супер, Баритона и других препаратов в условиях Поволжья // АПК России. 2017. Т. 24. № 2. С. 308–313.
19. Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Критская Е.Е. Применение Экспресса при возделывании подсолнечника // АПК России. 2017. Т. 24. № 3. С. 631–635.
20. Спиридонов Ю.Я., Будынков Н.И., Автаев Р.А., Стрижков Н.И., Суминова Н.Б., Критская Е.Е. Разработка технологии борьбы с вредными организмами с помощью секатора Турбо, Ламадора, Фалькона и других препаратов в посевах яровой пшеницы // АПК России. 2017. Т. 24. № 3. С. 636–642.

Influence of Various Weed Control Measures in Crop Rotation on the Final Field's Clogging

Yu. Ya. Spiridonov^{a,#}, N. I. Budynkov^a, I. V. Dudkin^{b,##},
N. I. Strizhkov^{c,###}, and N. B. Suminova^{d,####}

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

^b Kursk Research Institute of Agro-Industrial Production
d. Cheremushki village, Kursk region, Kursky district 305526, Russia

^c Research Institute of Agriculture of the South-East
ul. Tulikova 7, Saratov 410010, Russia

^d N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University
Teatralnaya pl. 1, Saratov 410012, Russia

[#]E-mail: spiridonov@vniif.ru

^{##}E-mail: kniapp@mail.ru

^{###}E-mail: raiser-saratov@mail.ru

^{####}E-mail: suminovan@mail.ru

The article presents the results of the study of the aftereffect of fertilizers and preparations used in the fight against weeds in the precursors to reduce weeds in the crops of the final crop rotation field-barley.

Key words: barley, mineral fertilizers, integrated techniques, agricultural practices, the weeds.

УДК 633.71:631.811.98:632.954

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГЕРБИЦИДА КОММАНД И РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ТАБАКА

© 2020 г. Л. М. Соболева¹, Т. В. Плотникова^{1,*}, Е. М. Тютюнникова¹¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт табака, махорки и табачных изделий
350072 Краснодар, ул. Московская, 42, Россия***E-mail: agrotobacco@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 10.07.2020 г.

Изучено влияние совместного применения почвенного гербицида команд, КЭ и регуляторов роста растений мелафен и эмистим С при возделывании рассады табака в условиях центральной зоны Краснодарского края. Предыдущими исследованиями установлено ингибирующее действие гербицида команд, КЭ в дозе 0.02 мл/м² на начальном этапе роста рассады табака. Для снятия химической нагрузки и увеличения ростовых процессов проведены исследования в парниковый период на фоне питательной смеси с оптимальным обеспечением основными элементами: NH₄ – 20 и NO₃ – 70, P₂O₅ – 60 и K₂O – 70 мг/100 г почвы. Определено, что предпосевное замачивание семян в растворе препарата мелафен (концентрация раствора 0.05%) и эмистим С (0.00001%) при экспозиции 3 ч с последующими обработками в основные фазы развития рассады “ушки” и “годная к высадке” (перед выборкой) на гербицидном фоне, способствовало увеличению высоты растений от корневой шейки до точки роста на 46–62%, до конца вытянутых листьев – на 20–35%, массы надземной части растений – на 42–86%, корневой системы – на 32%. Выход стандартной рассады к оптимальному сроку посадки увеличился на 28–36%. В результате проведенных обработок рассады отмечено пролонгированное действие стимуляторов мелафен и эмистим С, которое проявилось ускоренным ростом и развитием растений табака и получением достоверной прибавки урожая 16–24% (*HCP*₀₅ = 1.9). Применение регуляторов роста способствовало улучшению качества табачного сырья за счет повышения количества углеводов.

Ключевые слова: табак, рассада, гербицид команд, регуляторы роста мелафен и эмистим С, эффективность, урожайность, качество табачного сырья.

DOI: 10.31857/S0002188120100130

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении столетий человечество борется с сорными растениями, но так и не нашло пути оптимального их истребления. Эволюция не стоит на месте, и сорняки научились приспосабливаться к конкретно сложившейся ситуации, следовательно, и способы борьбы с ними приходится все время совершенствовать. Сегодня в нашей стране широкое распространение получила интегрированная система защиты и питания сельскохозяйственных культур, предполагающая использование при их выращивании как химических пестицидов, минеральных удобрений, так и биологических препаратов, регуляторов роста. Данная технология имеет ряд преимуществ: она позволяет снизить химическую нагрузку на почву и окружающую среду, а также стимулировать более гармоничное развитие растений и укрепление их иммунитета.

Поскольку табак является рассадной культурой, методы защиты от сорняков приходится планировать и применять на этапе закладки парников. Засоренность посевов начинает проявляться одновременно со всходами табака. Борьба с сорной растительностью в основном заключается в ручном ее удалении. Процесс этот очень трудоемкий [1]. Использование гербицидов на сегодняшний день ограничивается их отсутствием в “Списке пестицидов ...” (2019 г.), разрешенных для применения на табаке [2].

В этой связи в течение нескольких лет во ВНИИТТИ проходил испытания и на сегодняшний день адаптирован на табаке почвенный гербицид команд, КЭ (кломазон, 480 г/л) в дозах: 0.01 и 0.02 мл/м² (в зависимости от засоренности), который позволяет успешно бороться с доминирующими засорителями рассады: портулаком огородным (*Portulaca oleracea* L.), марью бе-

лой (*Chenopodium album* L.), канатником Теофраста (*Abutilon theophrasti* Medik.), щетинниками (*Setaria* sp. L.) и др.

Биологическая эффективность химиката в испытанных дозах за период многолетних учетов по снижению количества сорняков составила 86–98%, по снижению их массы – 87–89%. Однако ингибирующее действие комманд, отмеченное в начальной стадии роста рассады, так называемый эффект “гербицидной ямы”, в дальнейшем сказывается на росте и развитии растений табака и, как следствие, на количественном выходе и качестве стандартной рассады. Поэтому целесообразно провести исследования по совместному применению гербицида и регуляторов роста. Последние способны помочь растениям как в преодолении стрессовых состояний, вызванных химическим агентом, так и увеличить их ростовую активность [1, 3].

За последние годы во ВНИИГТИ был испытан разнообразный ассортимент перспективных регуляторов роста. Все примененные регуляторы в различной степени влияли на формирование табачной рассады. Среди них по положительному эффекту выделились препараты эмистим С и мелафен.

Эмистим С – биостимулятор растений, применяется для предпосевной обработки семян и опрыскивания растений в период вегетации. Является продуктом метаболизма симбиотного гриба *Acremonium lichenicola*, выделенного из корней женьшеня. Препарат усиливает способность растений сопротивляться неблагоприятным факторам внешней среды, снижает пестицидную и фунгицидную нагрузку.

Мелафен – регулятор роста растений, действующим веществом которого является меламинавая соль бис (оксиметил) фосфиновой кислоты, которая регулирует энергетические процессы в течение всего онтогенеза растений.

Предпосевное замачивание семян и двукратное опрыскивание рассады стимуляторами роста эмистим С (0.00001%) и мелафен (0.05%) в основные фазы развития растений “ушки” и “готовая к высадке” способствует значительному улучшению качества табачной рассады и достоверному повышению урожайности культуры [4, 5]. Цель работы – изучение влияния совместного применения гербицида комманд и регуляторов роста эмистим С и мелафен при выращивании табака.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Закладка опытов с применением стимуляторов роста эмистим С и мелафен на фоне предпо-

севного внесения почвенного гербицида комманд в дозе 0.02 мл/м² осуществлена в соответствии с “Методическим руководством по проведению агротехнических опытов с табаком в рассадниках” [6]. Посев и выращивание рассады проводили в соответствии с “Технологией выращивания рассады табака на несменяемой смеси в парниках и пленочных теплицах” [7]. Сорт табака – Остролист 316. Препараты испытывали на делянках площадью 1 м² в четырехкратной повторности. Все опыты осуществляли на естественном инфекционном фоне с оптимальным обеспечением питательными элементами: N–NH₄ – 20 и N–NNO₃ – 70, P₂O₅ – 60 и K₂O – 70 мг/100 г почвы. Необходимую дозу недостающих удобрений устанавливали по результатам агрохимического анализа парниковой питательной смеси. Недостаток компенсировали за счет доведения однокомпонентных минеральных удобрений за 5–7 сут до высева семян.

Для обработки семян использовали стимуляторы роста (замачивание в течение 3-х ч) с последующим двукратным некорневым опрыскиванием препаратами вегетирующей рассады в фазах “ушки” и “готовая к высадке” в концентрациях: мелафен – 0.05% и эмистим С – 0.00001%. Гербицид комманд в дозе 0.02 мл/м² вносили в виде водного раствора (1 л рабочего раствора/м²) с заделкой в почву за 2 нед до высева семян табака и периодическим поливом (в отсутствии осадков) обработанного участка в период от внесения до посева семян табака в количестве 10–15 л H₂O/м².

Качество рассады оценивали перед выборкой, брали по 25 растений с каждой делянки и измеряли их биометрические показатели: длину растений от корневой шейки до точки роста и до конца вытянутых листьев, количество листьев на растении, толщину стебля у корневой шейки, сырую массу надземной части и корневой системы [8].

Для дальнейшего изучения пролонгированного действия регуляторов роста, внесенных в рассадный период, на продуктивность культуры, рассаду после выборки четко по вариантам высаживали в поле с последующим наблюдением за ростом и развитием растений табака. Определяли высоту растений через 30 сут после посадки в фазе интенсивного роста и в период цветения 75–80% растений, площадь листа среднего яруса по таблицам Губенко [9] в третью – основную ломку – урожайность (ц/га). Табак убирали вручную в 5 приемов.

Оценку влияния гербицида комманд и регуляторов роста мелафен и эмистим С на химический состав табачного сырья (водорастворимые угле-

Таблица 1. Влияние совместного применения гербицида и регуляторов роста на качество и выход стандартной рассады табака (2018–2019 гг.)

Вариант	Длина рассады (см) до		Диаметр стебля, см	Количество листьев, шт./растение	Сырая масса 25-ти экз., г		Выход стандартной рассады, шт./м ²
	точки роста	конца вытянутых листьев			стеблей	корней	
Контроль (без обработки)	8.05	18.0	0.42	4.0	80.2	3.4	650
Комманд, КЭ + мелафен	11.8	21.6	0.48	4.0	114	4.5	811
Комманд, КЭ + эмистим С	13.0	24.3	0.55	4.0	149	4.5	885
Комманд, КЭ	9.38	20.4	0.45	4.0	91.6	4.0	830

воды, белковый азот и никотин) проводили в высушенном сырье [10, 11]. Достоверность полученной прибавки урожая рассчитывали методом статистической обработки результатов по [12] с применением компьютерной программы однофакторного дисперсионного анализа Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В парниковом хозяйстве института для уменьшения негативного влияния предпосевного внесения почвенного гербицида комманд, КЭ на рост и развитие табака проведены исследования по совместному применению гербицида в максимально испытанной эффективной дозе 0.02 мл/м² с регуляторами роста растений. Сравнительная характеристика рассады табака по биометрическим показателям выявила, что растения, выращенные на гербицидном фоне, ожидаемо превосходили по своему развитию те, которые росли без прополки, но существенно отстали от растений при применении регуляторов эмистим С и мелафен.

Высокие результаты качества рассады показали растения, выращенные на фоне применения регулятора роста эмистим С (0.00001%). Его эффективность превосходила контроль по основным показателям: длине растений до точки роста – на 62, до конца вытянутых листьев – на 35, массе наземной части – на 86, масса корней – на 32% (табл. 1). Увеличение качества рассады под воздействием препарата мелафен относительно контроля наблюдали в следующих пределах: длина растений до точки роста – на 46, до конца вытянутых листьев – на 20, масса наземной части – на 42, масса корней – на 32%. Толщина стебля растений у корневой шейки при обработке регуляторами роста увеличилась на 0.14–0.31 см по сравнению с контролем.

Однако при выгонке рассады важно получить не только качественную рассаду, но также необходимо ее вырастить в достаточном количестве. Причинами, приводящими к изреженности всходов рассады, могут являться вредители, болезни, длительно несменяемая парниковая смесь, низкое содержание подвижных форм азота в субстрате и т.п. Выход стандартной рассады к моменту высадки в поле на делянках с использованием регуляторов роста превысил контроль на 28–36%. Выход стандартной рассады на гербицидном фоне превосходил контроль на 25%.

Для оценки продуктивности культуры в целом растения после выборки в соответствии с вариантами парникового опыта высаживали в полевых условиях. Визуальные наблюдения показали, что высаженная в поле рассада табака довольно хорошо прижилась во всех вариантах, но имела различия в процессе роста. На протяжении всей вегетации проводили различные учеты, которые позволили установить, что растения с участка, обработанного препаратом комманд, КЭ, уступали по развитию табаку, выращенному при применении регуляторов роста.

Одним из важнейших показателей продуктивности табака является урожайность его листьев, на которой отразились все отмеченные выше различия в росте и развитии растений. Наибольшая урожайность табачного сырья получена с растений, обработанных в рассадный период стимуляторами роста эмистим С и мелафен, достоверная прибавка урожая составила 24 и 16% соответственно ($HCP_{05} = 1.9$ ц/га) (рис. 1). В варианте, где был высажен табак с гербицидного фона, прибавка урожайности составила 13%.

Табачный лист является пищевым продуктом, поэтому важно определить влияние использованных препаратов на химический состав табака.

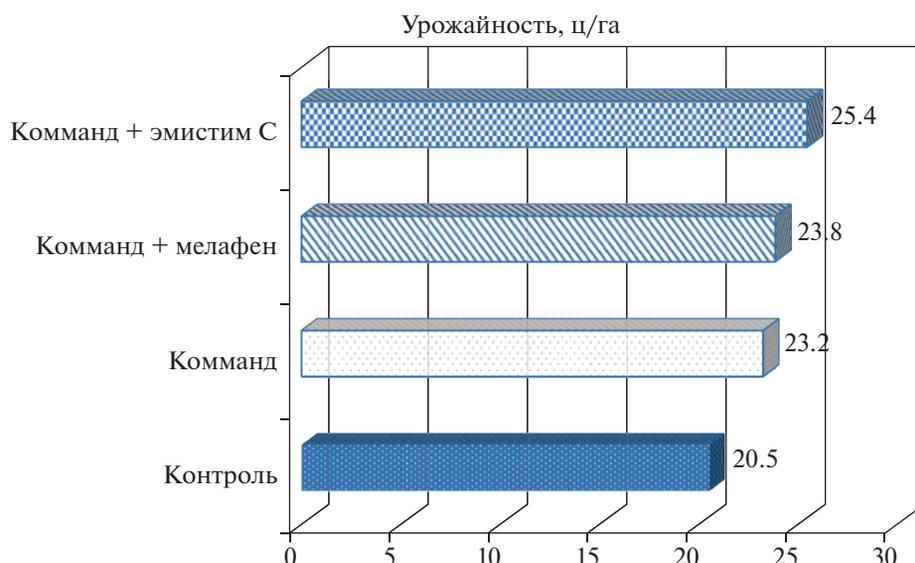


Рис. 1. Урожайность табака при использовании гербицида комманд совместно с регуляторами роста растений.

Проведенная оценка табачного сырья, полученного в разные сроки ломки, с применением регуляторов роста на гербицидном фоне, показала,

Таблица 2. Влияние применения регуляторов роста на гербицидном фоне на химический состав табачного сырья (2018–2019 гг.)

Вариант	Содержание, %			Число Шмука
	никотин	углеводы	белки	
1-я ломка				
Контроль	0.8	6.9	5.4	1.3
Комманд	0.7	6.2	5.7	1.1
Комманд + мелафен	0.6	10.0	5.8	1.7
Комманд + эмистим С	0.7	10.4	5.8	1.8
2-я ломка				
Контроль	1.2	9.1	7.5	1.2
Комманд	1.4	10.1	6.2	1.6
Комманд + мелафен	1.3	12.2	6.8	1.8
Комманд + эмистим С	1.6	14.5	6.9	2.1
3-я ломка				
Контроль	1.0	4.7	6.6	0.8
Комманд	1.1	5.5	6.3	0.9
Комманд + мелафен	1.0	7.5	5.8	1.3
Комманд + эмистим С	1.0	8.3	6.2	1.3

что примененные препараты не оказали существенного влияния на количество никотина в табачном сырье, и его показатели находились в пределах контроля опыта (табл. 2). Количество белков в вариантах также находилось на уровне контроля. Улучшение качества сырьевой продукции произошло за счет повышения количества углеводов. За счет этого и число Шмука, как основного показателя качества табачного сырья, выраженного в углеводно-белковом соотношении, увеличилось. Стоит отметить, что качественным является сырье, где число Шмука >1. Кроме того, определили, что гербицид комманд не ухудшал химический состав табачного сырья в сравнении с контролем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате совместного применения почвенного гербицида комманд, КЭ (внесенного за 2 нед до посева в дозе 0.02 мл/м²) и регуляторов роста мелафен (0.05%) и эмистим С (0.00001%) при замачивании семян с экспозицией 3 ч и дальнейших обработках в основных фазах развития рассады “ушки” и “годная к высадке” рассада, удалось не только снизить количество сорного компонента и токсическую нагрузку на табак, но и увеличить выход стандартной рассады на 28–36%. В полевых условиях за счет пролонгированного действия стимуляторов получена существенная прибавка урожайности табака 3.3–4.9 ц/га ($HCP_{05} = 1.9$) при сохранении достойного качества табачного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболева Л.М., Плотникова Т.В.* Эффективность гербицидов Стомп и Комманд при выращивании рассады табака // Сб. тр. Международ. научн.-практ. конф. “Наука, производство, бизнес: современное состояние и пути инновационного развития аграрного сектора на примере агрохолдинга “Байсерке-Агро”. Алматы, 2019. С. 105–106.
2. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. М.: Справ. издание, 2019. 848 с.
3. *Тютюнникова Е.М., Плотникова Т.В.* Значение регуляторов роста в растениеводстве и использование их в качестве элемента ресурсосберегающей экологизированной технологии выращивания табака // Инновационное развитие науки и образования. Монография. Пенза: МЦНС “Наука и просвещение”, 2018. С. 125–136.
4. *Плотникова Т.В., Тютюнникова Е.М.* Эффективность применения биостимулятора Эмистим С при выращивании табака // Земледелие. 2017. № 3. С. 9–11.
5. *Тютюнникова Е.М., Плотникова Т.В.* Использование регулятора роста Мелафен с целью улучшения посевных свойств семян и качества табачной рассады // Международ. научн.-практ. конф. “Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции”. Краснодар, 2017. С. 219–223. URL: http://vniitti.ru/conf/conf2017/sbornik_conf2017.pdf
6. *Алехин С.Н., Плотникова Т.В., Саломатин В.А., Мурзинова И.И., Сидорова Н.В.* Методическое руководство по проведению агротехнических опытов с табаком в рассадниках. Краснодар: ВНИИТТИ, 2013. 27 с.
7. *Оказов П.Н., Иваненко Б.Г., Мурзинова И.И.* Технология выращивания рассады табака на несменяемой питательной смеси в парниках и пленочных теплицах. Краснодар, 1987. 32 с.
8. ОСТ 10-113-88. Рассада табака. Технические условия. М.: Росагропром, 1998. 8 с.
9. *Губенко Ф.П.* Таблицы площадей табачных листьев (группа третья). Симферополь: Гос. изд-во Крымской АССР, 1936. 45 с.
10. *Мохначев И.Г., Писклов В.П., Шерстяных Н.А.* Методы анализа табака и табачного дыма. Краснодар, 1976. 83 с.
11. Табак и табачные изделия. Определение алкалоидов в табаке. Спектрофотометрический метод: ГОСТ 30038-93. Введ. 1995-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1995. 11 с.
12. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Results of Combined Utilization of Herbicide Command and Growth Stimulators for Tobacco Growing

L. M. Soboleva^a, T. V. Plotnikova^{a, #}, and E. M. Tutunnikova^a

^a All-Russian Research Institute of Tobacco, Makhorka and Tobacco Products
Moskovskay ul. 42, Krasnodar 350072, Russia

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

Effect of combined applying soil herbicide Command CE with growth stimulators Melafen and Emistim S for tobacco seedling growing in central zone of Krasnodar region has been studied. Earlier studies have discovered inhibiting effect of herbicide Command CE in concentration of 0.02 ml/m² at first stages of plant development. For decreasing negative herbicidal effect on tobacco seedlings and improving their growing processes researches on seedbed soil with optimal concentration of basic nutrients: NH₄ – 20, NO₃ – 70, P₂O₅ – 60, and K – 70 mg/100 g has been carried. It is discovered that soaking of seeds during 3 hours in solution of Melafen (concentration 0.05%) and Emistim S (concentration 0.00001%) before sowing in combination with further treatments on basic stages of plant development (cotyledone and ready for transplanting) led to increasing of plant length from root collar to growing point – by 46–62, to leaf tips – by 20–35, above ground plant mass by 42–86, roots – by 32%. Output of standard seedlings has increased by 28–36%. As the result of seedlings treatments by Melafen and Emistim S their prolonged effect has been observed, this caused increased seedlings rates of growing and developing and obtaining productivity increasing by 16–24% (smallest significant difference or $SSD_{05} = 1.88$). Utilizing growth stimulators led to improving quality of cured tobacco due to increasing of carbohydrates content.

Key words: tobacco, seedlings, weeds, herbicide Command, growth stimulator Melafen and Emistim S, efficiency, productivity, quality of cured tobacco.

УДК 546.47:631.41:633.16

ПОДВИЖНОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ МИГРАЦИИ Zn В СИСТЕМЕ ЧЕРНОЗЕМ ТИПИЧНЫЙ–РАСТЕНИЯ ЯЧМЕНЯ

© 2020 г. В. С. Анисимов^{1,*}, Л. Н. Анисимова¹, Л. М. Фригидова¹, А. И. Санжаров¹, Ю. Н. Корнеев¹, Р. А. Фригидов¹, Д. В. Дикарев¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249030 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 109 км, Россия

*E-mail: vsanisimov@list.ru

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.

После доработки 18.05.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

В вегетационных опытах с ячменем на черноземе типичном, в который дополнительно вносили Zn, установлено, что концентрация металла в почвенном растворе уменьшалась со временем, а относительное содержание подвижных форм Zn достоверно не изменялось, но оно возрастало с увеличением концентрации металла в почве. На основании данных динамики прироста биомассы ячменя, накопления и выноса Zn разными органами растений установлены и формализованы закономерности, параметры которых отражают особенности динамики накопления биомассы и выноса Zn ячменем. Установлено, что с ростом количества внесенного Zn доля выноса металла в результате конвективного переноса снижалась. Изучено изменение кислотности почвенных растворов, извлеченных из чернозема разных вариантов опыта.

Ключевые слова: ячмень, Zn, формы нахождения, динамика, надземная биомасса, корни, транспирация, почва, почвенный раствор, концентрация, эффективная диффузия, конвективный массоперенос.

DOI: 10.31857/S0002188120120030

ВВЕДЕНИЕ

Корневое поглощение микроэлементов растениями зависит как от эдафических, так и биологических факторов и является “одним из важнейших факторов жизнедеятельности растений” [1]. Для количественного описания подобных процессов наряду с простыми эмпирическими моделями, имеющими ограниченное применение, широко используются полумеханистические модели поглощения элементов питания и микроэлементов растениями [1–6]. Хотя в этих моделях исследователи и стараются учесть механизмы процессов, происходящих при корневом поглощении микроэлементов растениями, полностью освободиться от необходимости использования эмпирических зависимостей не удается [1, 7]. К основным механизмам относятся: процессы сорбции–десорбции ионов микроэлементов на границе раздела твердой и жидкой фаз, конвективно-диффузионное передвижение ионов к поверхности корня, поглощение их апопластом и переход в симпласт с реализацией механизмов активного и пассивного переноса через плазмалемму, рост корневой системы и изменение площади

рабочей поверхности корней [1, 7]. Скорость поступления ионов в растения контролируется главным образом скоростью их вступления в контакт с поглощающей поверхностью корней, а последняя, в свою очередь, зависит от интенсивности 3-х процессов [2]: роста корней, сопровождающегося изменением их рабочей поверхности и проникновением в новые участки слоя почвы, конвективного и диффузионного массопереноса ионов через поверхность раздела почвенный раствор–поверхность корня.

В работах [1, 2] была предложена достаточно простая конвективно-диффузионная полумеханистическая модель корневого поглощения ионов ТМ. В ней количественно описано поглощение ионов, обусловленное 3-мя вышеуказанными процессами, исходя из линейного конвективно-диффузионного потока ионов к рассматриваемой в виде плоскости поглощающей поверхности корней, площадь которой изменяется во времени.

Используя подходы, предложенные вышеупомянутыми исследователями, были заложены вегетационные опыты с внесением в почву различ-

ных доз Zn для изучения в динамике процессов прироста биомассы тест-растений, изменения концентрации металла в надземных частях и корнях растений, изменения площади рабочей поверхности корней, выноса Zn с надземной биомассой и корнями. Также были исследованы динамика содержания доступных растениям форм Zn в почве и переход его в почвенный раствор. Цель работы – оценка в контролируемых условиях вегетационного опыта параметров процесса массопереноса ионов цинка в корни и надземные органы растений ячменя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поведение Zn в системе почва–растение изучали в вегетационных опытах в контролируемых тепличных условиях: температура 20–27°C, относительная влажность воздуха 60–70%, влажность почвы 64% ПВ (при более низкой влажности почвы возникали сложности с отбором центрифужных почвенных растворов (ЦПР)). Объектом исследования служил ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Зазерский 85, выращиваемый на черноземе типичном (Курская обл., Медвенский р-н). Физические и химические показатели почвы (табл. 1) определяли общепринятыми методами [8, 9]: pH_{KCl} (pH_{H_2O}) – потенциометрическим методом в суспензии почвы в 1 М растворе KCl (дистиллированной воде) при соотношении твердой и жидкой фаз 1 : 2.5, гранулометрический состав почв – пипеточным методом Качинского [8, 10], содержание гумуса – по методу Тюрина, гидролитическую кислотность – по Каппену, сумму поглощенных оснований – по Каппену–Гильковицу, содержание подвижных форм P_2O_5 – по Чирикову и K_2O – по Масловой. Предварительная подготовка чернозема перед определением исходных физико-химических характеристик включала доведение его до воздушно-сухого состояния и просеивание через сито с диаметром отверстий 1 мм. Растения выращивали в пластиковых сосудах, содержащих 5 кг (в пересчете на абсолютно-сухую массу) чернозема типичного. В почву были высажены пророщенные 3-суточные семена в количестве 25 шт./сосуд. Перед посевом в почву вносили Zn (в виде водного раствора нитрата) при тщательном перемешивании и разминании образующихся почвенных комочков в количестве 100, 250, 500 мг/кг почвы. Затем аналогичным образом добавляли питательные элементы в виде водных растворов солей (NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , K_2SO_4) из расчета $N_{200}P_{100}K_{100}$. При этом в каждом варианте, включая контрольный, количество внесенного азота корректировали с помощью азотно-

Таблица 1. Основные характеристики чернозема типичного

Показатель	Величина показателя
pH_{KCl}	5.49 ± 0.01
pH_{H_2O}	6.23 ± 0.02
Гумус, %	5.13 ± 0.19
Массовая доля фракции (мм) в почве, %	
1–0.25	0.77
0.25–0.05	0.47
0.05–0.01	50.6
0.01–0.005	10.7
0.005–0.001	8.52
<0.001	29.0
Физическая глина (<0.01 мм)	48.1
Илистая фракции (<2 μ m), %	33.4
H_r , мг-экв/100 г почвы	3.17 ± 0.01
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	34.4 ± 0.2
Обменный K_2O , мг/кг (по Масловой)	124 ± 2.4
Подвижный P_2O_5 , мг/кг (по Чирикову)	120 ± 1.3
Валовое содержание Zn в нативной почве, мг/кг	55.7 ± 2.2

кислого аммония до указанной величины содержания его в почве (в варианте с максимальной дозой Zn содержание азота, внесенного в виде $Zn(NO_3)_2$, составляло 215 мг/кг и корректировку дозы не проводили).

После внесения растворов солей почву в сосудах инкубировали, поддерживая заданную в эксперименте влажность в течение 21 сут перед посадкой проростков ячменя. Выбор доз Zn обусловлен соответствием их ранее установленному диапазону оптимальных концентраций металла в исследованной почве [11, 12], при которых не отмечены эффекты фитотоксичности, в то же время фиксировали достаточно высокие концентрации Zn в разных частях растений и квазиравновесных почвенных растворах, позволяющие надежно детектировать в них металл. Контролем для каждого из вариантов Zn_0 , Zn_{100} , Zn_{250} , Zn_{500} являлся соответствующий вариант без растений (черный пар).

Отдельные показатели регистрировали в динамике. Для этого из сосудов через 7, 14, 21, 30, 45 и 70 сут отбирали по 2 растения и проводили анализ морфометрических показателей надземных органов. В корнях определяли содержание Zn, а также

их сырую и сухую массу (после размывания в сосуде и отмывания от почвенных частиц деионизированной водой). Параллельно из почв извлекали ЦПР. Концентрацию Zn в растениях, содержание подвижных и кислоторастворимых форм элемента в почвах определяли в соответствии с методикой [14], а также с помощью ее модификаций, изложенных в работах [15, 16]. Содержание подвижных форм ТМ определяли экстракцией с помощью ацетатно-аммонийного буфера (рН 4.8) и вытяжки 1 М HCl. Валовое количество цинка в почве определяли по методу Обухова–Плехановой [17]. Воздействие загрязнения чернозема Zn на состояние растений оценивали в динамике.

После уборки урожая были определены морфометрические показатели: длина растений, количество стеблей на одно растение, количество колосьев, масса корней, соломы и колоса, было определено содержание макро- и микроэлементов в зеленой массе, в соломе, корнях и зерне.

Ежедневно проводили контроль массы сосудов с вегетирующими растениями и без них, долив их дистиллированной водой до влажности, соответствующей 64% ПВ. Формирующийся суточный дефицит массы почвы в последних был обусловлен физическим испарением, а различия в массе сосудов с вегетирующими растениями за 1 сут были связаны с эвапотранспирацией. Дефицит влаги в сосудах с растениями, обусловленный совместными процессами десукции и транспирации рассчитывали по разности между дефицитом влаги, обусловленным эвапотранспирацией (в вариантах с растениями) и физическим испарением (в вариантах исследованных почв без растений). Опыты проводили в четырехкратной повторности. Квазиравновесные почвенные растворы были получены с помощью центрифугирования в соответствии с методикой [18]. Использовали центрифужные стаканы с вкладышами (куда помещалась влажная почва), изготовленные из тефлона (ПТФЭ). Вкладыши имели перфорированное дно. В извлеченных почвенных растворах определяли рН, содержание Zn, микро- и макроэлементов. Концентрацию Zn в анализированных растворах определяли методом ICP-OES на приборе Liberty II фирмы “Varian” в соответствии с [19].

Прирост надземной биомассы растений описывали с помощью логистической (*S*-образной) функции [18, 20–22]

$$M(t) = \frac{M_{\max}}{1 + \frac{M_{\max}}{M_0} \exp(-\mu t)}, \quad (1)$$

где M_{\max} – максимальная возможная масса 1 растения, г; M_0 – начальная масса 1-го растения (расчетная величина), г; μ – удельная скорость прироста биомассы растения, сут⁻¹; t – время, сут.

Зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах растений от времени аппроксимировали с помощью уравнения Вуда [23]:

$$[Zn]_{\text{раст}} = at^b \exp(-ct), \quad (2)$$

где a (мг кг⁻¹ сут^{-b}), b и c (сут⁻¹) – параметры.

Динамику выноса Zn с биомассой описывали с помощью логистической функции:

$$W(t) = \frac{W_{\max}}{1 + \frac{W_{\max}}{W_0} \exp(-ut)}, \quad (3)$$

где W_{\max} – максимально возможный вынос Zn одним растением, мкг; W_0 – начальный вынос (расчетная величина); u – константа выноса Zn с биомассой, сут⁻¹, t – время, сут.

Величины параметров уравнений (1), (2) и (3) M_{\max} , M_0 , W_{\max} , W_0 , u , μ , a , b и c подбирали с использованием модуля “Поиск решения” программы Excel. При этом применяли алгоритм последовательных итераций, использующий минимизацию ошибки $E = \sum [K_c(\text{расч}) - K_c(\text{измерен})]^2$. Статистический анализ экспериментальных данных проводили стандартными методами с использованием MS-Excel в соответствии с требованиями, изложенными в работах [24, 25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В течение вегетационного периода из почвенных сосудов сразу после высаживания пророщенных семян ячменя (на 21-е сут после внесения Zn в почву), а также соответственно на 51-, 71-, 83- и 120-е сут после внесения Zn в почву извлекали квазиравновесные почвенные растворы методом центрифугирования. Динамика изменения концентрации Zn в них представлена на рис 1. Установлено, что уменьшение концентрации Zn в почвенном растворе в зависимости от времени можно удовлетворительно описать (после исключения промахов) степенными уравнениями:

$$\begin{aligned} [Zn]_{\text{почв.раствор}} &= 5.39t^{-0.79}, \\ R^2 &= 0.99 \text{ (вариант Zn}_0, \text{ рис. 1a),} \\ [Zn]_{\text{почв.раствор}} &= 46.5t^{-1.19}, \\ R^2 &= 0.93 \text{ (вариант Zn}_{100}, \text{ рис. 1б),} \\ [Zn]_{\text{почв.раствор}} &= 145t^{-1.40}, \\ R^2 &= 0.60 \text{ (вариант Zn}_{250} \text{ рис. 1в),} \end{aligned}$$

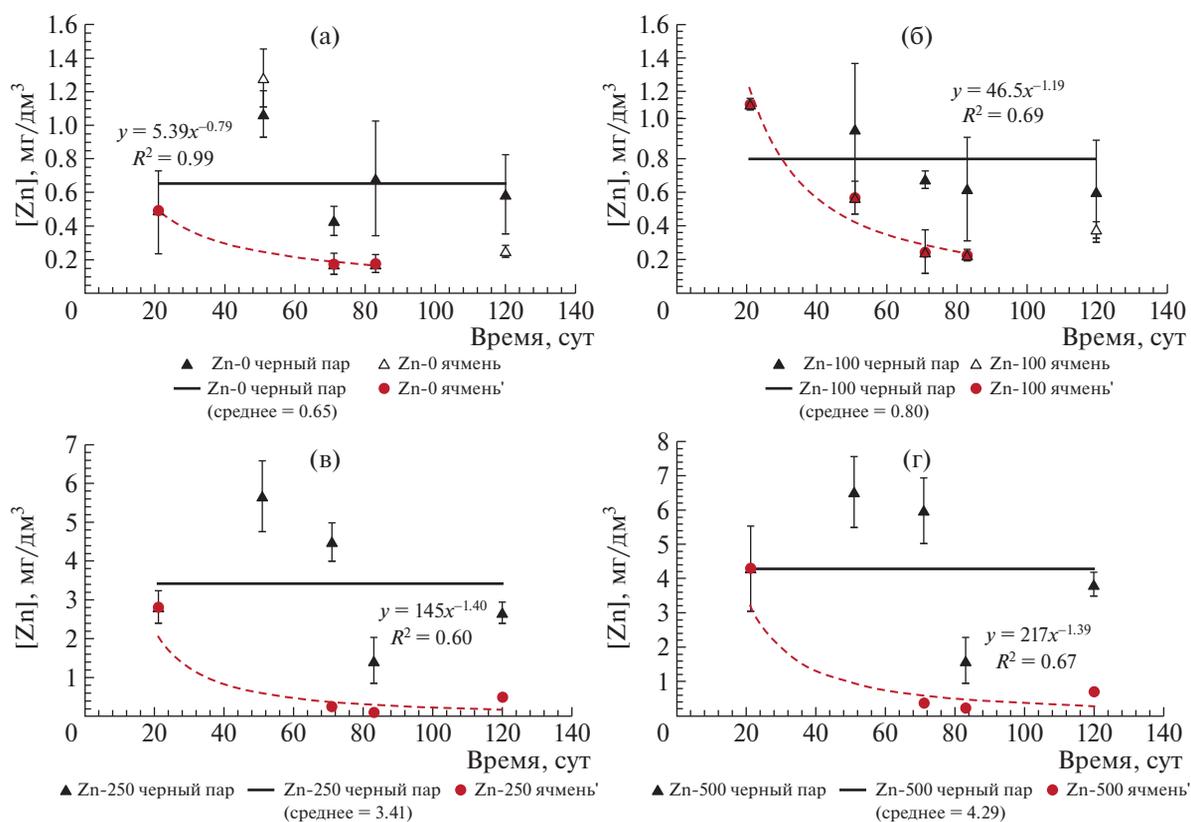


Рис. 1. Динамика концентрации Zn в квазиравновесном почвенном растворе, извлеченном из типичного чернозема вариантов “черный пар” и “ячмень”, мг/дм³: (а) – Zn₀, (б) – Zn₁₀₀, (в) – Zn₂₅₀, (г) – Zn₅₀₀. То же на рис. 2–9. Горизонтальные сплошные линии на графиках – средние концентрации цинка в почвенных растворах за период проведения опытов.

$$[Zn]_{\text{почв.раствор}} = 217t^{-1.39},$$

$$R^2 = 0.67 \text{ (вариант Zn}_{500}\text{, рис. 1г).}$$

Снижение концентрации Zn в почвенных растворах, отобранных из сосудов с вегетирующими растениями особенно заметное в сравнении с концентрацией металла в почвенных растворах, извлеченных из вариантов опыта с черным паром, связано как с истощением запаса водорастворимых форм Zn в почве в результате непрерывного поглощения корнями растений, не компенсируемого десорбцией Zn из почвенного поглощающего комплекса (ППК) в почвенный раствор, так и с процессами возможной трансформации подвижных (доступных растениям) форм нахождения металла в малоподвижные (“фиксации” Zn). На кривых зависимостей $[Zn]_{\text{почв.р-р}} = f(t)$, полученных для вариантов опыта с растениями отмечено увеличение концентрации металла в почвенных растворах на 120-е сут с начала инкубации Zn в почве (100-е сут с момента посадки проростков, фаза развития ячменя – восковая спелость) по сравнению с 83-ми сут (фа-

за развития ячменя – предмолочная спелость). Это объясняется значительным снижением в первом случае поступления ионов цинка в корни растений ввиду засыхания последних и, как следствие, преобладания процессов десорбции Zn из ППК в почвенный раствор по сравнению с поглощением металла растениями. В ходе экспериментов проводили изучение динамики трансформации подвижных (извлекаемых 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, рН 4.8) форм нахождения Zn в типичном черноземе. Результаты представлены на рис. 2. Графический анализ полученных результатов показал, что отрицательная динамика исследованного показателя прослежена лишь в качестве тенденции, не подкрепленной достоверными статистическими данными.

В целом содержание подвижных форм Zn в почве (в % от общего содержания) возрастало с увеличением количества внесенного в почву металла. Полученная зависимость хорошо описывается с помощью уравнения асимптоты (рис. 3): $Zn_{\text{подв.}}(\%) = Zn_{\text{подв.,max}}(\%) \times (1 - \exp(-a \times [Zn]_{\text{вал.}}))$, где $Zn_{\text{подв.}}(\%)$ – содержание подвижного цинка в

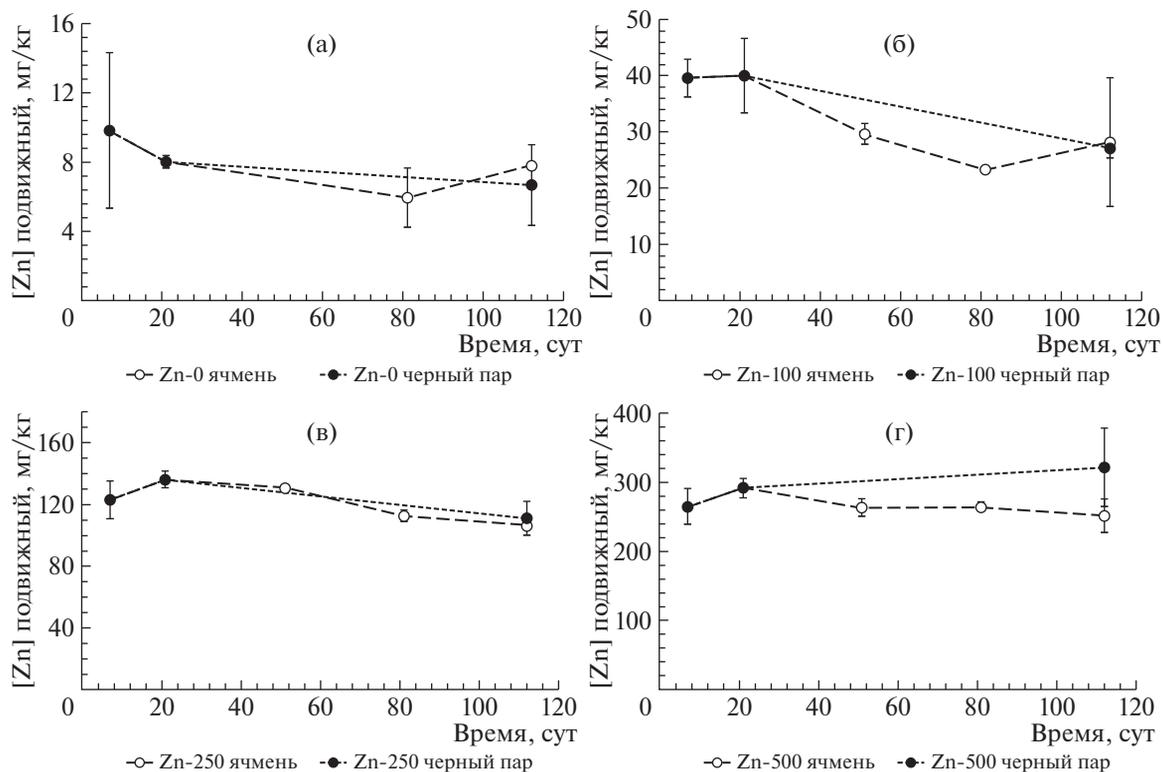


Рис. 2. Динамика содержания подвижного Zn (извлекаемого 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, pH 4.8) в типичном черноземе вариантов “черный пар” и “ячмень”, мг/кг.

почве; $Zn_{\text{подв., max}}(\%)$ – максимальное содержание подвижного цинка в почве – расчетная величина (параметр); a – параметр, (кг мг^{-1}); $[Zn]_{\text{вал.}}$ – общее содержание цинка в почве, (мг кг^{-1}) – независимая переменная. Величины параметров, подобранные по критерию минимизации ошибки между расчетными и экспериментальными данными $Zn_{\text{подв.}}(\%)$ ($E = \sum [K_c(\text{расч}) - K_c(\text{измерен})]^2$), составили: $Zn_{\text{подв., max}}(\%) = 61.5 \pm 9.8\%$ ($t = 6.27, p = 0.024$ при $v = 2$), $a = 3.1 \times 10^{-3} \text{ кг мг}^{-1}$ ($t = 6.27, p = 0.024$ при $v = 2$); t – критерий значимости параметра, p – уровень значимости при числе степеней свободы, равном v .

Данные прироста надземной массы ячменя аппроксимировали с помощью уравнения логистической кривой (рис. 4). Величины параметров логистической кривой M_{max} (г) M_0 (г), μ (сут^{-1}) для типичного чернозема при различных дозах внесенного в почву Zn представлены в табл. 2. Положительная динамика изменения биомассы отмечена приблизительно до 75-ти сут, после чего увеличение биомассы не наблюдали.

В целом можно выделить тенденцию к увеличению надземной биомассы по мере роста количества внесенного в чернозем цинка до дозы Zn_{500}

(при последней дозе металла наблюдали уменьшение биомассы). Снижение надземной биомассы ячменя при дозе Zn_{100} , начиная с 50-х сут (табл. 2, рис. 4) было обусловлено однократным негативным неконтролируемым внешним воздействием, вызвавшим в дальнейшем угнетение растений данного варианта.

Полученные данные динамики накопления (концентрации) Zn в надземных органах ячменя

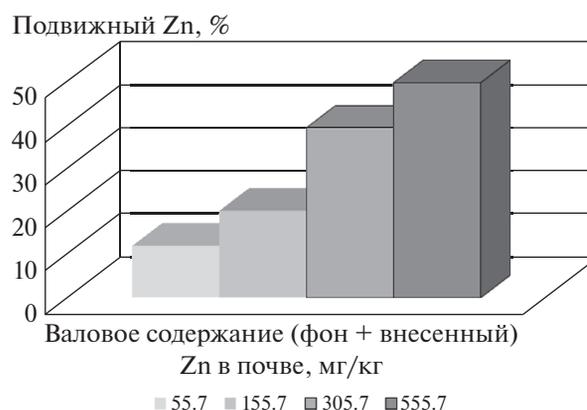


Рис. 3. Среднее (для всех сроков отбора) содержание подвижного Zn, (извлекаемого 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, pH 4.8) в типичном черноземе, % от валового.

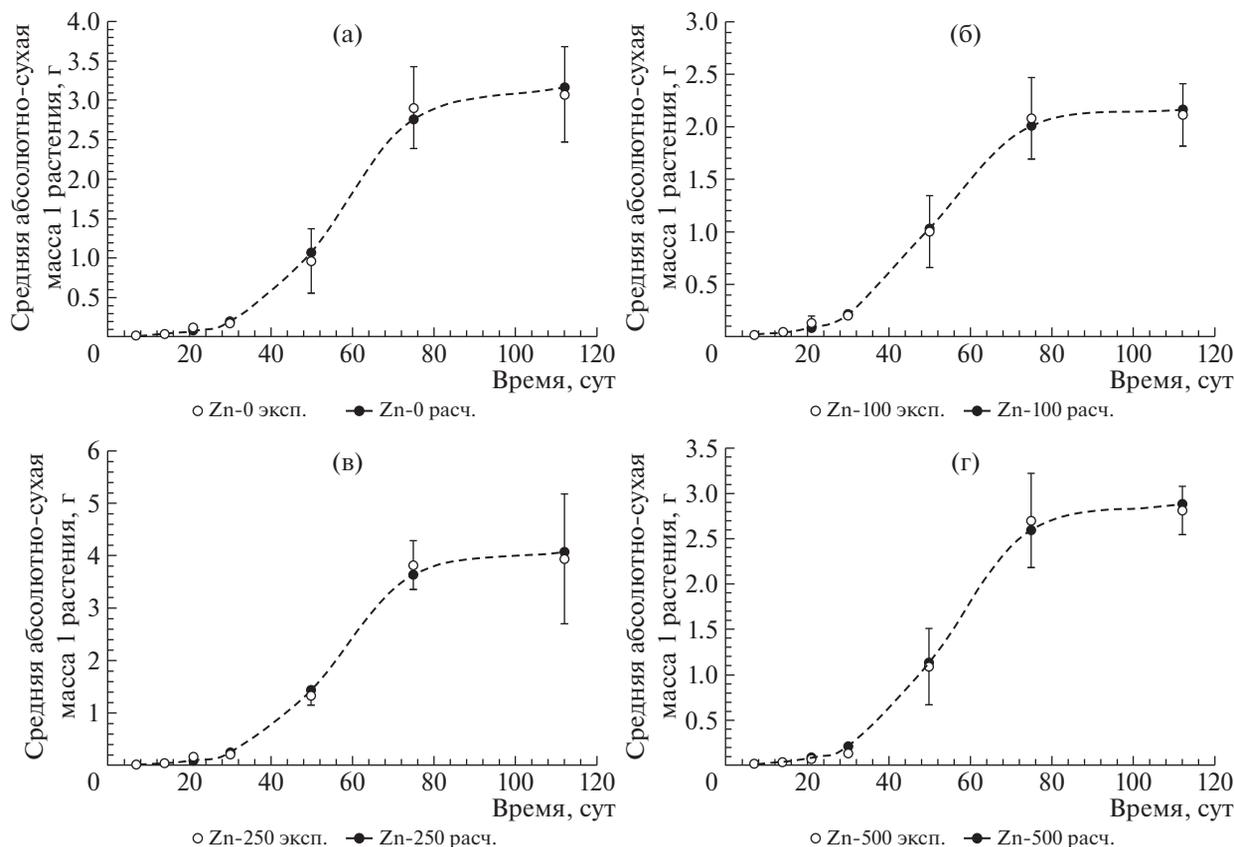


Рис. 4. Динамика изменения надземной биомассы ячменя, выращенного на черноземе типичном до фазы созревания, в пересчете на одно растение, $\text{г} \times \text{растение}^{-1}$.

показали, что содержание Zn (равно как и других двухвалентных катионов) в растениях в целом увеличивалось в ходе онтогенеза. Зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах растений (мг/кг сухой массы) от времени (рис. 5) имеет вид одновершинной кривой с выраженной положительной асимметрией (крутая левая ветвь и полого падающая правая). Ввиду сложного характера экспериментально установленной зависимости $[\text{Zn}]_{\text{раст.}} = f(t)$ для надземной биомассы ячменя подобрать идеальное уравне-

ние для аппроксимации затруднительно. Тем не менее, подобная зависимость, как отмечено выше, может быть описана уравнением Вуда [23], отражающим взаимодействие конкурирующих процессов накопления в фитомассе и перераспределения Zn между разными органами растений. С использованием уравнения (2) удалось объяснить 62% варибельности результативного признака в варианте Zn_0 и 77, 51, 73% – в вариантах Zn_{100} , Zn_{250} , Zn_{500} соответственно.

Таблица 2. Количественные параметры логистических кривых изменения сухой надземной биомассы ячменя (в пересчете на одно растение), выращенного на черноземе типичном до фазы созревания зерна

Вариант	ν^*	$M_{\text{max}}, \text{г}$	$t; p^{**}$	$M_0, \text{г}$	$t; p$	$\mu, \text{сут}^{-1}$	$t; p$
Zn_0	4	3.12 ± 0.07	46.1; 1×10^{-6}	0.003 ± 0.002	1.41; 0.23	0.13 ± 0.01	9.15; 8×10^{-4}
Zn_{100}	4	2.16 ± 0.05	45.8; 1×10^{-6}	0.008 ± 0.004	1.87; 0.13	0.11 ± 0.01	9.94; 6×10^{-4}
Zn_{250}	4	4.00 ± 0.09	47.0; 1×10^{-6}	0.002 ± 0.002	1.13; 0.32	0.14 ± 0.02	7.73; 1.5×10^{-3}
Zn_{500}	4	2.83 ± 0.03	103.6; 1×10^{-7}	0.002 ± 0.001	2.48; 0.07	0.13 ± 0.01	16.4; 8×10^{-5}

*Число степеней свободы.

** t – критерий значимости параметра, p – уровень значимости. То же в табл. 4.

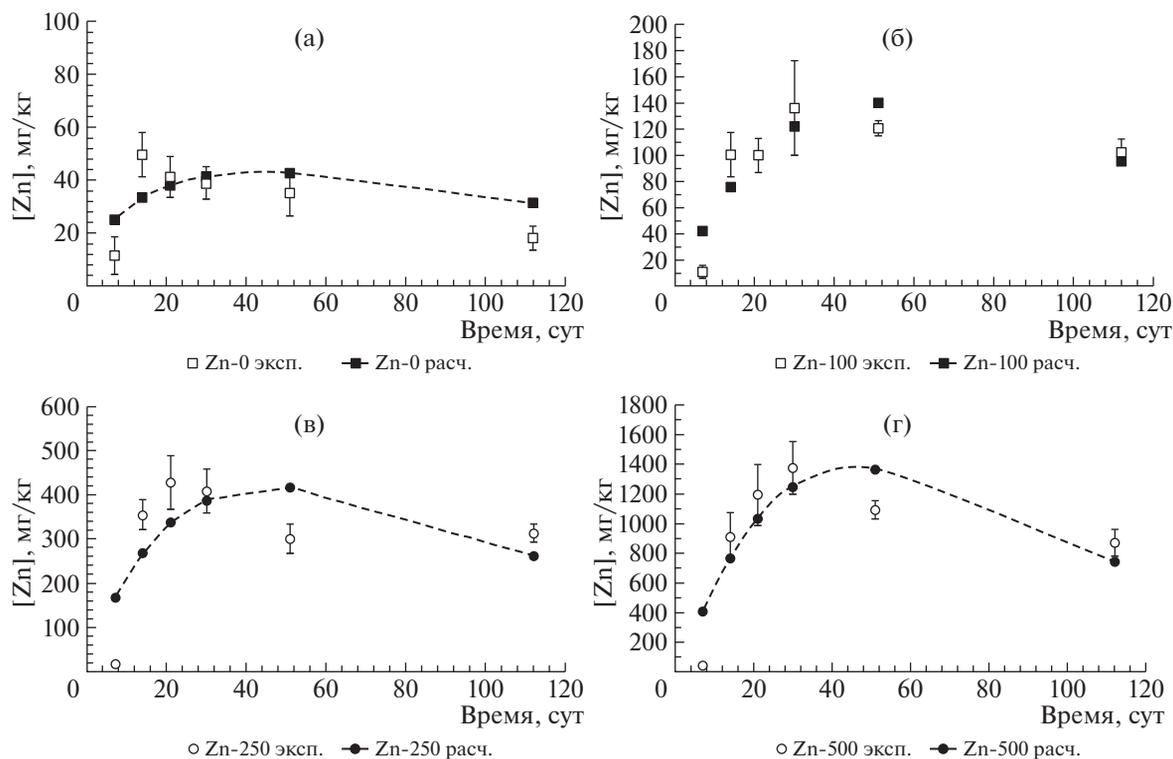


Рис. 5. Динамика накопления Zn в надземной фитомассе ячменя (в пересчете на сухую массу) до фазы созревания, выращенного на типичном черноземе, мг/кг.

Величины параметров a ($\text{мг кг}^{-1} \text{сут}^{-b}$), b и c (сут^{-1}), рассчитанные для разных вариантов опыта на черноземе типичном представлены в табл. 3. Динамика выноса Zn с надземной биомассой в пересчете на одно растение представлена на рис. 6. Величины параметров полученной логистической кривой W_{max} (мкг), W_0 (мкг), u (сут^{-1}) для типичного чернозема при различных дозах внесенного в почву Zn представлены в табл. 4. С использованием уравнения (2) и подобранных параметров удалось объяснить 93 (вариант Zn_0) и 99% вариабельности результативного признака (варианты Zn_{100} , Zn_{250} , Zn_{500}).

В ходе вегетационного опыта были оценены количественные параметры конвективного потока влаги из почвы в корни растений и сопряженного с ним массопереноса ионов цинка. На основании полученных данных была оценена скорость транспирации влаги растениями ячменя. Полученные опытные данные удалось удовлетворительно аппроксимировать с помощью логистической функции (рис. 7):

$$T(t) = \frac{T_{\text{max}}}{1 + \frac{T_{\text{max}}}{T_0} \exp(-\gamma t)}, \quad (4)$$

где T_{max} – максимально возможная транспирация влаги одним растением, $\text{мл H}_2\text{O}/(\text{растение} \times \text{сут})$, T_0 – начальная транспирация (расчетная величина), $\text{мл H}_2\text{O}/(\text{растение} \times \text{сут})$, γ – константа транспирации H_2O надземной биомассой растений, сут^{-1} , t – время, сут. Общей закономерностью для всех полученных кривых является то, что, начиная приблизительно с 55-х сут (фаза развития растений – цветение), процесс транспирации замедлялся. Связано это с прекращением интенсивного роста биомассы растений и началом процесса созревания зерна. Полученные опытные данные удалось удовлетворительно аппрок-

Таблица 3. Количественные параметры кривых, аппроксимирующих концентрации Zn в сухой надземной биомассе ячменя, выращенного на черноземе типичном до фазы созревания, от времени

Вариант	a , $\text{мг кг}^{-1} \text{сут}^{-b}$	b	c , сут^{-1}
Zn_0	5.05	0.88	0.03
Zn_{100}	6.50	1.04	0.02
Zn_{250}	34.8	0.88	0.02
Zn_{500}	51.0	1.16	0.02

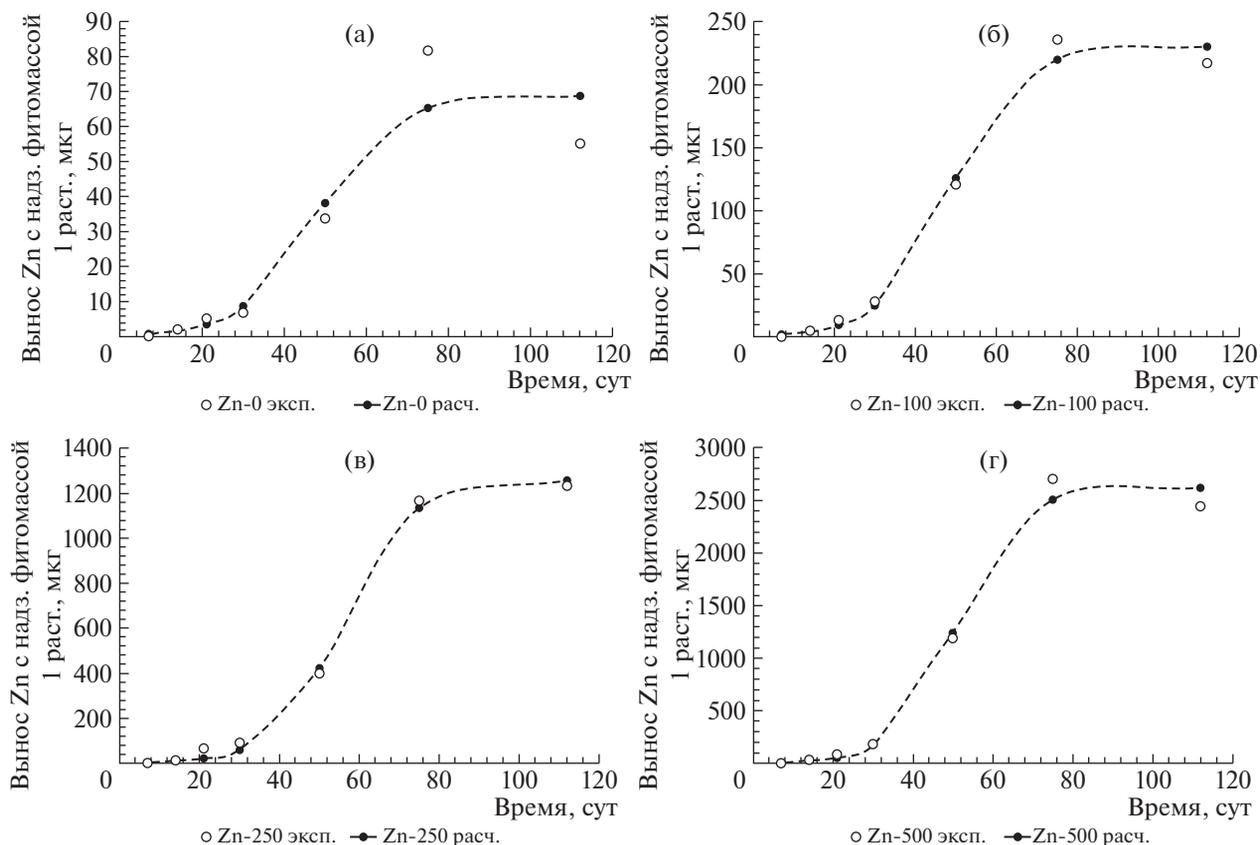


Рис. 6. Динамика выноса Zn надземной фитомассой ячменя, выращенного на типичном черноземе до фазы созревания, мкг/растение.

симировать с помощью обратной логистической функции (рис. 7):

$$T(t_{(i)} - t_{(55)}) = \frac{T'_{\max}}{1 + \frac{T'_{\max}}{A} \exp[\lambda(t_{(i)} - t_{(55)})]}, \quad (5)$$

где T'_{\max} – максимально возможная транспирация влаги одним растением, мл H_2O /(растение × сут), A – параметр (расчетная величина), имеющий ту же размерность, что и T'_{\max} – мл H_2O /(растение × сут); λ – константа транспирации H_2O надземной биомассой растений, сут⁻¹, t – время, сут. Величины

параметров T_{\max} , T_0 , γ , соответствующих логистических кривых для типичного чернозема на этапе роста транспирации влаги растениями обобщены в табл. 5. Величины параметров T'_{\max} , A , λ соответствующих логистических кривых для типичного чернозема на этапе уменьшения транспирации влаги растениями обобщены в табл. 6.

Вынос Zn из почвы с конвективным потоком влаги в пересчете на одно растение можно получить, используя данные транспирации воды растениями ячменя в течение вегетационного периода, представленные на рис. 7, формализованные с помощью логистических уравнений, параметры

Таблица 4. Количественные параметры логистических кривых, описывающих динамику выноса Zn надземной фитомассой ячменя (мкг/растение), выращенного на типичном черноземе до фазы созревания

Вариант	v	W_{\max} , мкг	$t; p$	W_0 , мкг	$t; p$	U , сут ⁻¹	$t; p$
Zn ₀	4	68.9 ± 7.93	8.7; 3.3 × 10 ⁻⁴	0.375	–; –	0.11 ± 0.01	9.2; 2.6 × 10 ⁻⁴
Zn ₁₀₀	4	231 ± 10	24.0; 2 × 10 ⁻⁵	0.72 ± 0.81	0.89; 0.43	0.12 ± 0.02	5.03; 7 × 10 ⁻³
Zn ₂₅₀	4	1260 ± 40	31.6; 6 × 10 ⁻⁶	1.11 ± 1.09	1.02; 0.37	0.12 ± 0.02	6.63; 2.7 × 10 ⁻³
Zn ₅₀₀	4	2600 ± 1	23.9; 2 × 10 ⁻⁵	0.46	–; –	0.17 ± 0.08	2.12; 0.10

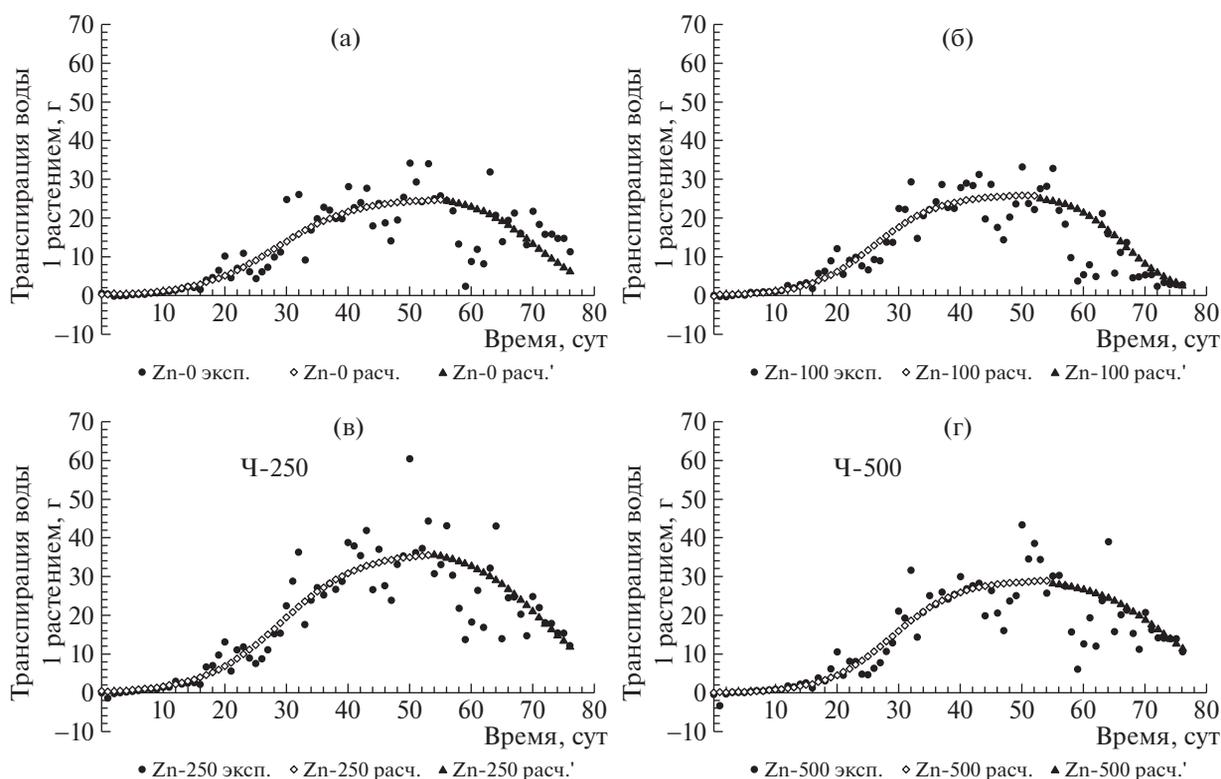


Рис. 7. Динамика транспирации влаги надземными органами ячменя, выращенного на черноземе типичном до фазы созревания (в пересчете на одно растение), $\text{мл} \times \text{раст}^{-1} \times \text{сут}^{-1}$.

которых приведены в табл. 5, 6, и данных динамики концентрации [Zn] в почвенных растворах в течение вегетационного периода (рис. 1).

С использованием данных о транспирации воды растениями и концентрациях Zn в почвенных растворах для разных вариантов опыта были построены кумулятивные кривые выноса Zn из типичного чернозема растениями с конвективным потоком влаги (рис. 8 – заштрихованные точки), а также рассчитаны величины максимального выноса Zn ячменем с конвективным потоком влаги, мкг/растение : 228 (Zn_0), 350 (Zn_{100}), 654

(Zn_{250}), 1080 (Zn_{500}). Динамика массы корней ячменя оценена в рамках специального эксперимента с разборными вегетационными сосудами, где почву, загрязненную Zn в дозах, равных тем, что были использованы в стандартных вегетационных сосудах-лизиметрах Митчерлиха, отделяли от растущих корней с помощью биофильных мембран. Дизайн этих сосудов, изготовленных из плексигласа, описан ранее в работе [26]. На определенной стадии развития растений (синхронно с отбором растений из вегетационных сосудов-лизиметров) плексигласовые сосуды разбирали и

Таблица 5. Количественные параметры транспирации влаги надземными частями ячменя, выращенного на черноземе типичном, на этапе роста транспирации до фазы цветения

Вариант	T_{\max}	T_0	$\gamma, \text{сут}^{-1}$
	$\text{мл H}_2\text{O}/(\text{растение} \times \text{сут})$		
Zn_0	25.0	0.26	0.161
Zn_{100}	26.0	0.17	0.193
Zn_{250}	36.5	0.36	0.159
Zn_{500}	29.5	0.13	0.186

Таблица 6. Количественные параметры транспирации влаги надземными частями ячменя, выращенного на черноземе типичном, на этапе уменьшения транспирации до фазы созревания зерна

Вариант	T'_{\max}	A	$\lambda, \text{сут}^{-1}$
	$\text{мл H}_2\text{O}/(\text{растение} \times \text{сут})$		
Zn_0	25.9	470	0.155
Zn_{100}	26.3	310	0.230
Zn_{250}	37.9	490	0.165
Zn_{500}	29.9	580	0.170

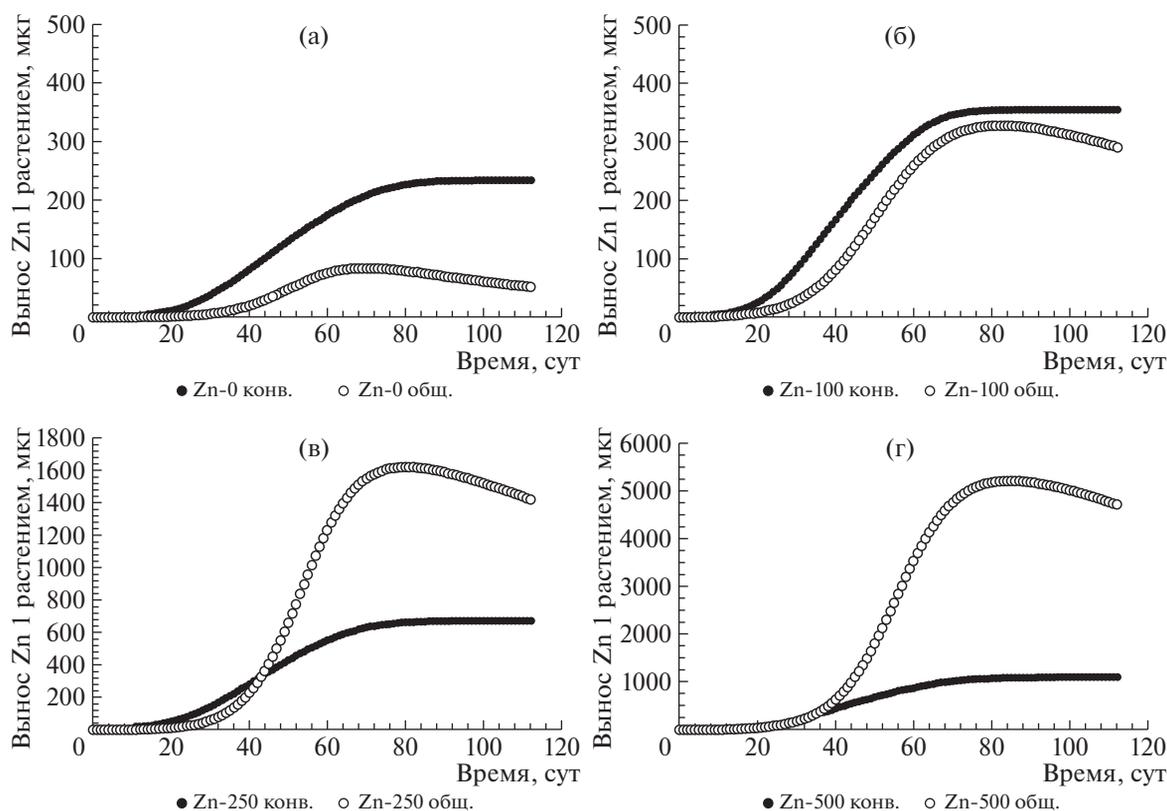


Рис. 8. Динамика выноса Zn из типичного чернозема растениями в течение вегетационного периода (в пересчете на одно растение), мкг \times растение⁻¹: с конвективным потоком влаги (заштрихованные точки, расчетные величины), общего, включающего диффузионную и конвективную компоненты (открытые точки, экспериментально установленные величины).

анализировали соотношение масс надземной части растений и корней. Было установлено, что эти соотношения в зависимости от времени и количества внесенного в почву Zn можно в первом приближении удовлетворительно описать с помощью линейных регрессионных уравнений: $m_{\text{н.ч.}}/m_{\text{корни}} = 0.066t$, $R^2 = 0.77$ (вариант Zn₀); $m_{\text{н.ч.}}/m_{\text{корни}} = 0.053t$, $R^2 = 0.85$ (вариант Zn₁₀₀); $m_{\text{н.ч.}}/m_{\text{корни}} = 0.039t$, $R^2 = 0.96$ (вариант Zn₂₅₀); $m_{\text{н.ч.}}/m_{\text{корни}} = 0.027t$, $R^2 = 0.99$ (вариант Zn₅₀₀). Рассчитанные соотношения вместе с известными массами надземных частей растений и концентрацией Zn в корнях ячменя, выращенного в вегетационных сосудах-лизиметрах, позволили рассчитать вынос Zn корнями в динамике с помощью аппроксимирующих регрессионных уравнений, параметры которых представлены в табл. 7 и 8.

Общий вынос Zn растениями из почвы складывался из сумм выносов металла корнями и надземными органами (теоретически соотношение $W_{\text{конв.}}/W_{\text{общ.}}$ должно быть <1). В настоящей работе приведены данные общего выноса металла корнями и надземными органами ячменя. Общий

вынос Zn из почвы, по существу, объединяющий диффузионную и конвективную компоненты, в динамике также представлен на рис. 8 (кривые с открытыми точками). Обращает на себя внимание следующая закономерность: с ростом количества внесенного в почву Zn доля выноса металла в результате конвективного переноса неуклонно снижалась. Однако для варианта Zn₀, $W_{\text{конв.}}/W_{\text{общ.}} = 4.4$ (рис. 8а), что, безусловно, вызвало вопросы и могло быть связано как с кумулятивным эффектом ошибок при определении параметров регрессионных уравнений $[Zn]_{\text{почв.раствор}} = f(t)$ и $T = f(t)$ в условиях чрезвычайно низких концентраций Zn в почвенных растворах (и высочайшей их варибельности), так и с недоучетом потерь цинка в результате листового опада и перераспределения металла между вегетативными и генеративными органами растений. Для вариантов Zn₁₀₀, Zn₂₅₀ и Zn₅₀₀ величины $W_{\text{конв.}}/W_{\text{общ.}}$ соответственно были равны 1.2, 0.5 и 0.2. Прояснить подобное миграционное поведение Zn в системе почва–растение помогают данные изменения концентрации ионов оксония в почвенных рас-

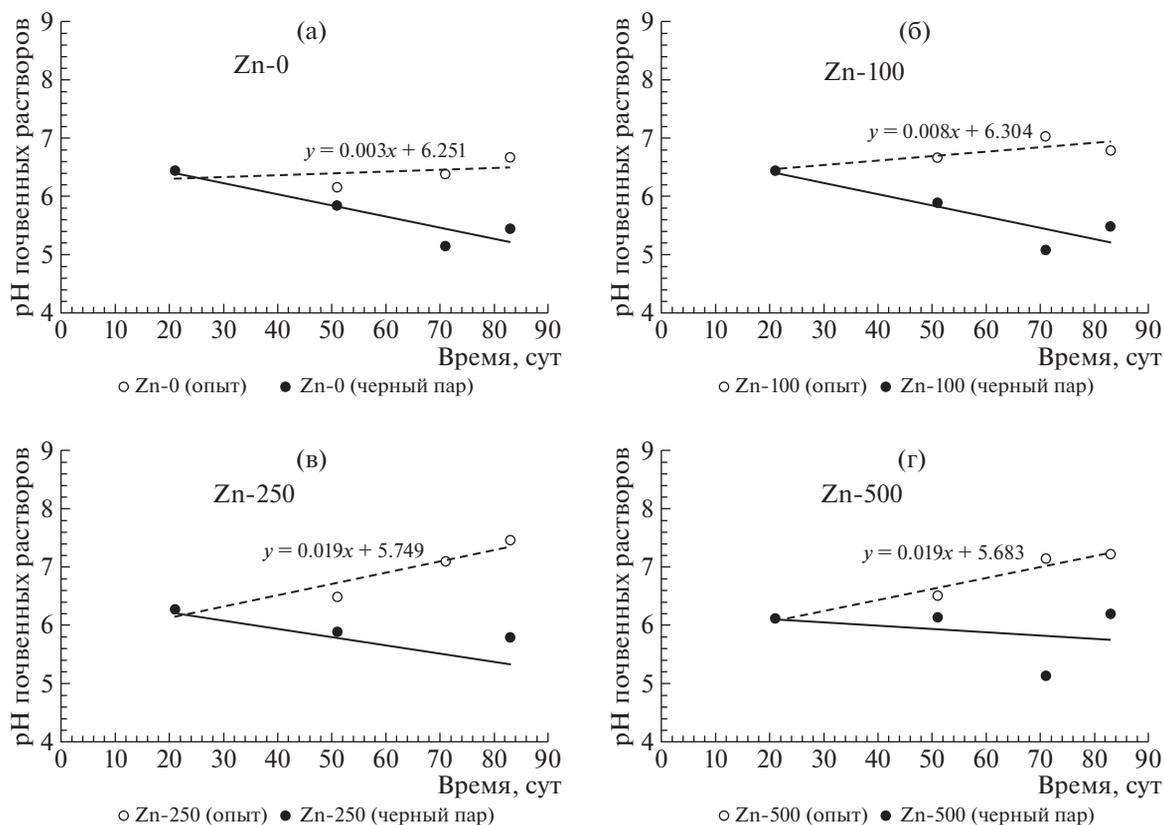


Рис. 9. Динамика изменения рН почвенных растворов, извлеченных из типичного чернозема (варианты – “с растениями” и “черный пар”) в течение вегетационного периода.

творах, приведенные на рис. 9. Из этого следуют несколько закономерностей:

- при выращивании ячменя в течение вегетационного опыта наблюдали положительную динамику величин рН (причем значимость ее возрастала с увеличением количества Zn, внесенного в почву);
- в вариантах “черный пар”, наоборот, отмечена отрицательная динамика величин рН;
- величины показателя рН в квазиравновесных почвенных растворах, отобранных в вариан-

тах опыта “черный пар” были практически на 1 ед. меньше величины рН образцов, отобранных в вариантах с растениями. Связано это с хорошо известным и многократно описанным в научной литературе фактом эквивалентного обмена нитрат-ионов при корневом их поглощении из почвенного раствора на присутствующие в цитозоле гидрокарбонат- и гидроксид-ионы, что приводит к подщелачиванию системы почва–почвенный раствор в прикорневой зоне, и как следствие, уменьшению подвижности в ней ионов тяжелых

Таблица 7. Количественные параметры логистических кривых изменения сухой массы корней ячменя (в пересчете на одно растение), выращенного на черноземе типичном до фазы созревания зерна

Вариант	M_{\max}	M_0	μ , сут ⁻¹
	г		
Zn ₀	0.50	0.006	0.105
Zn ₁₀₀	0.45	0.007	0.120
Zn ₂₅₀	1.10	0.008	0.116
Zn ₅₀₀	1.12	0.014	0.112

Таблица 8. Количественные параметры логистических кривых изменения концентрации Zn в сухой надземной биомассе корней ячменя, выращенного на черноземе типичном до фазы созревания

Вариант	$[Zn]_{\max}$, корни	$[Zn]_{\min}$, корни	В, сут ⁻¹
	мг/кг		
Zn ₀	35.0	1.32	0.059
Zn ₁₀₀	209	6.28	0.056
Zn ₂₅₀	488	11.6	0.053
Zn ₅₀₀	1110	27.4	0.049

металлов, включая Zn. Соответственно, снижается количество металла, поступающего в растения с конвективным потоком влаги. В темное время суток устьица, расположенные на листьях растений, закрываются, массоперенос элементов с конвективным потоком влаги снижается до нуля. Однако в то же время создаются благоприятные условия для диффузии тяжелых металлов от поверхности ППК к корневому поглощающему комплексу (КПК). Эффективность данного процесса существенно возрастает в ранние утренние часы благодаря выделению корнями ячменя естественных водорастворимых полидентантных лигандов различной природы – фитосидерофоров в прикорневой зоне. Известно, что значительная часть однодольных растений (пшеница, кукуруза, ячмень и др.) выделяет в почву хелатирующие лиганды, называемые фитосидерофорами (ФС) из семейства мугеневых кислот для извлечения железа и цинка из почвы (стратегия II извлечения микроэлементов) [27–31]. После высвобождения в ризосферу ФС связывают и переводят в водорастворимую форму Fe, Zn и др. микроэлементы из почвы путем образования водорастворимых полидентантных комплексов с металлами, которые легко поглощаются злаковыми растениями. Для многих культурных злаковых видов (в том числе пшеницы и ячменя) экссудация ФС в основном происходит в апикальной зоне корней, подчиняясь циркадному ритму: начинается после наступления светлого времени суток и достигает максимума через 4–6 ч [27]. ФС также способны эффективно извлекать и связывать в виде водорастворимых комплексных соединений катионы металлов, связанные с природными водонерастворимыми органо-минеральными соединениями (например, гуматами). Одновременно с восходом солнца происходит раскрытие устьиц листьев и возобновляется процесс конвективного массопереноса элементов с “обогащенным” металлами благодаря фитосидерофорам почвенным раствором. Однако раствор в прикорневой зоне быстро “истощается”, поскольку: а) растения через несколько часов перестают выделять фитосидерофоры и б) конвективный поток влаги возрастает в течение дня с ростом температуры и увеличением инсоляции, вовлекая сравнительно “бедный” металлами почвенный раствор из дальних частей прикорневой зоны. Поскольку отбор проб из вегетационных сосудов для извлечения почвенных растворов проводили ближе к полудню, то фиксировали заниженные концентрации в них металлов (включая Zn). Это могло приводить к недооценке конвективной составляющей массопереноса Zn в растения, особенно в вариантах

опыта с большими дозами внесенного Zn, где наблюдали более сильное подщелачивание среды. Изложенная гипотеза, безусловно, требует тщательной проверки с использованием специальных методов отбора образцов квазиравновесных почвенных растворов (в динамике) и применения ВЭЖХ-хроматографии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для всех вариантов опыта установлено, что концентрация цинка в почвенном растворе уменьшалась со временем в соответствии с обратной степенной зависимостью вследствие процесса истощения запаса водорастворимых форм Zn в почве в результате непрерывного поглощения корнями растений.

Эмпирически установленные закономерности прироста биомассы и выноса металла разными органами растений описывается логистическими функциями с 3-мя параметрами: M_{\max} (г), M_0 (г), μ (сут^{-1}) – для накопления биомассы; W_{\max} (мкг), W_0 (мкг), u (сут^{-1}) – для выноса Zn. Накопление Zn вегетативными органами ячменя удовлетворительно аппроксимируется уравнением Вуда (одновершинной кривой с выраженной положительной асимметрией) с 3-мя параметрами, a ($\text{мг кг}^{-1} \text{сут}^{-b}$), b и c (сут^{-1}). Величины этих параметров отражают особенности динамики накопления биомассы, накопления и перераспределения Zn между разными органами растений, а также выноса Zn ячменем в условиях различного загрязнения чернозема исследованным элементом. Графический анализ динамики трансформации подвижных (извлекаемых 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, рН 4.8) форм нахождения Zn в типичном черноземе показал, что отрицательная динамика исследованного показателя прослежена лишь в качестве тенденции, не подкрепленной достоверными статистическими данными. В то же время содержание подвижных форм Zn в почве (в % от валового содержания) возрастало с увеличением количества внесенного в почву металла. Полученная зависимость может быть удовлетворительно аппроксимирована с помощью уравнения асимптотической функции: $Zn_{\text{подв.}} (\%) = 61.5(1 - \exp(-0.0031[Zn]_{\text{вал.}}))$.

Были рассчитаны общий вынос Zn из почвы, включающий диффузионную и конвективную компоненты, а также вынос металла из почвы условно “конвективной” составляющей массопереноса. Выявлена следующая закономерность: с ростом количества внесенного в почву Zn доля выноса металла в результате “конвективного” переноса неуклонно снижалась. Например, для ва-

рианта Zn_0 , $W_{\text{конв.}}/W_{\text{общ.}} = 4.5$, для вариантов Zn_{100} , Zn_{250} и Zn_{500} , величины $W_{\text{конв.}}/W_{\text{общ.}}$ соответственно были равны 1.2, 0.5 и 0.2.

Изучено изменение концентрации ионов оксония в почвенных растворах, извлеченных из чернозема разных вариантов опыта. Выявлено несколько закономерностей:

– при выращивании ячменя в течение вегетационного опыта наблюдали положительную динамику величин рН (причем значимость ее возрастала с увеличением количества Zn, внесенного в почву);

– в вариантах “черный пар”, наоборот, отмечена отрицательная динамика величин рН;

– величины показателя рН в квазиравновесных почвенных растворах, отобранных из вариантов опыта “черный пар” были практически на 1 ед. меньше величин рН образцов, отобранных в вариантах с растениями. Связано это с хорошо известным и многократно описанным в научной литературе фактом эквивалентного обмена нитрат-ионов при корневом их поглощении из почвенного раствора на присутствующие в цитозоле гидрокарбонат- и гидроксил-ионы, что приводит к подщелачиванию системы почва–почвенный раствор в прикорневой зоне, и как следствие, уменьшению подвижности в ней ионов тяжелых металлов, включая Zn.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид А.С. Математическая модель как метод изучения корневого поглощения веществ растениями // *Агрохимия*. 1974. № 3. С. 122–131.
2. Прохоров В.М. Математическая модель поглощения элементов растениями из почвы // *Агрохимия*. 1970. № 7. С. 126–136.
3. Най П.Х., Тинкер П.Б. Движение растворов в системе почва–растение. М.: Колос, 1980. 368 с.
4. Barber S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach (second edition). N.Y.: John Wiley & Sons, 1995. 384 p.
5. Barber S.A., Chen J.-H. Using a mechanistic model to evaluate the effect of soil pH on phosphorus uptake // *Plant and Soil*. 1990. V. 124. P. 183–186.
6. Adhikari T., Rattan R.K. Modelling zinc uptake by rice crop using a Barber-Cushman approach // *Plant and Soil*. 2000. V. 227. P. 235–242.
7. Фрид А.С. Миграционная концепция доступности веществ почвы корням растений // *Агрохимия*. 1996. № 3. С. 29–37.
8. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
9. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
10. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
11. Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Анисимова Л.Н., Гераськин С.А., Дикарев Д.В., Фригидова Л.М., Фригидов Р.А., Белова Н.В. Оценка миграционной способности и фитотоксичности Zn в системе почва–растение // *Агрохимия*. 2013. № 1. С. 64–74.
12. Анисимов В.С., Кочетков И.В., Дикарев Д.В., Анисимова Л.Н., Корнеев Ю.Н., Фригидова Л.М. Влияние физико-химических характеристик почв на биологическую доступность природного и радиоактивного цинка // *Почвоведение*. 2016. № 8. С. 942–954.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16080025>
13. Колосов И.И. Поглощительная деятельность корневых систем растений. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 388 с.
14. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (изд. 2-е, перераб. и доп.). М.: ЦИ-НАО, 1992. 61 с.
15. Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Дикарев Д.В., Фригидов Р.А., Корнеев Ю.Н., Санжаров А.И., Арышева С.П. Оценка миграционной способности Zn в системе почва–растение // *Почвоведение*. 2018. № 4. С. 427–438.
16. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V., Bauer T.V., Sushkova S.N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil // *MethodsX*. 2018. V. 5. P. 217–226.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>
17. Обухов А.И., Плеханова И.О. Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1991. 184 с.
18. Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Корнеев Ю.Н., Фригидов Р.А., Санжаров А.И., Дикарев Д.В., Кочетков И.В. Исследование миграционной способности Zn в системе дерново-подзолистая почва–кормовые бобы в условиях вегетационного опыта // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 72–84.
19. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. ПНДФ 16.1:2.3:3.11–98. М., 1998. (изд-е 2005 г). 28 с.
20. Рашкович Н.Л. Моделирование показателей минерального питания растений методом регрессионного анализа // *Агрохимия*. 1995. № 6. С. 97–106.
21. Дричко В.Ф., Изосимова А.А. Влияние возрастающих доз извести на урожай и скорость роста растений рапса и овса // *Агрохимия*. 2005. № 8. С. 19–23.
22. Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В. Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // *Докл. РАСХН*. 2014. № 1. С. 50–53.
23. Франс Дж., Торнли Дж.Х.М. Математические модели в сельском хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1987. 400 с.
24. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.

25. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. 3-е изд. М.: Диалектика, 2007. 912 с.
26. Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Дикарев Д.В., Фригидов Р.А., Кочетков И.В., Санжарова Н.И. Оценка миграционной способности Zn в системе почва–растение // *Biogeosyst. Technique*. 2015. V. 4. № 2. P. 153–163. <https://doi.org/10.13187/bgt.2015.4.153>. www.ejournal19.com
27. Takagi S., Nomoto K., Takemoto T. Physiological aspect of mugineic acid, a possible phytosiderophore of graminaceous plants // *J. Plant Nutr.* 1984. V. 7. P. 469–477. <https://doi.org/10.1080/01904168409363213>
28. Marschner H., Römheld V., Kissel M. Different strategies in higher-plants in mobilization and uptake of iron. // *J. Plant Nutr.* 1986. V. 9. P. 695–713.
29. Suzuki M., Takahashi M., Tsukamoto T., Watanabe S., Matsuhashi S., Yazaki J., Kishimoto N., Kikuchi S., Nakanishi H., Mori S., Nishizawa N.K. Biosynthesis and secretion of mugineic acid family phytosiderophores in zinc-deficient barley // *Plant J.* 2006. V. 48 P. 85–97. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2006.02853.x>
30. Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 336 с.
31. Walter M., Oburger E., Schindlegger Y., Hann S., Puschenreiter M., Kraemer S.M., Schenkeveld W.D.C. Retention of phytosiderophores by the soil solid phase – adsorption and desorption // *Plant Soil.* 2016. V. 404. P. 85–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2800-x>

Mobility and Migration Parameters of Zn in the Typical Chernozem–Barley System

V. S. Anisimov^{a,#}, L. N. Anisimova^a, L. M. Frigidula^a, I. A. Sanzharov^a, J. N. Korneev^a, R. A. Frigidov^a, and D. V. Dikarev^a

^a Russian Institute of Radiology and Agroecology
Kievskoe shosse 109 km, Kaluga region, Obninsk 249030, Russia

#E-mail: vsanisimov@list.ru

In the vegetation experiments with barley on typical Chernozem, in which Zn was added, it was found that the metal concentration in the soil solution decreased over time, and the relative content of mobile forms of Zn did not significantly change, however, it increased with increasing metal concentration in the soil. On the basis of data on the dynamics of barley biomass growth, accumulation and removal of Zn by different organs of plants, regularities were established and formalized, the parameters of which reflect the dynamics of biomass accumulation and removal of Zn by barley. It was found that with an increase in the amount of Zn applied, the share of metal removal as a result of convective transport decreases. Changes in the acidity of soil solutions extracted from Chernozem from different variants of the experiment were also studied.

Key words: barley, Zn, mobile forms, dynamics, aboveground biomass, roots, transpiration, soil, soil solution, concentration, effective diffusion, convective mass flow.

УДК 632.122.1:631.445

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ЛУГОВЫХ ПОЧВАХ РЕКИ УПА В ЗОНЕ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2020 г. Л. В. Переломов^{1,*}, Д. Л. Пинский², И. В. Переломова³, Ю. М. Агрошенко¹¹ Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
300026 Тула, просп. Ленина, 125, Россия² Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 2, Россия³ Тульский государственный университет 300026 Тула, просп. Ленина, 92, Россия

*E-mail: perelomov@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.04.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

Изучено содержание и распределение ряда тяжелых металлов (ТМ) в естественных и пахотных аллювиальных луговых почвах в зоне влияния комбината черной металлургии. Содержание большинства ТМ, за исключением Zn и Fe, в изученных почвах находилось в пределах установленных нормативов и величин кларка. В верхнем слое естественной аллювиальной луговой почвы отмечены наиболее высокие концентрации Mn и Fe, что может свидетельствовать об их аккумуляции из выпадений металлургического комбината. В пахотной почве верхний слой содержал максимальные валовые количества всех элементов, за исключением свинца. Самые высокие концентрации подвижных форм всех элементов (за исключением Zn) отмечены в верхнем слое почв естественного сложения, обладающих наибольшим содержанием гумуса и физической глины и с рН_{KCl}, близким к нейтральной реакции. Сельскохозяйственное освоение данных почв могло служить причиной изменения характера распределения валовых и подвижных форм элементов по профилю.

Ключевые слова: тяжелые металлы, аллювиальные луговые почвы, р. Упа, зона индустриального воздействия.

DOI: 10.31857/S0002188120120078

ВВЕДЕНИЕ

Пойменные почвы, занимающие в России 29.2 млн га, имеют большое экономическое и экологическое значение [1]. Несмотря на различия пойменных почв по соотношению почвообразовательного и аллювиально-седиментационного процессов, степени и характеру гидроморфизма, истории формирования и развития, все они обладают рядом общих свойств, главными из которых являются слоистость почвенного профиля, аккумуляция данными почвами наряду с автохтонным аллохтонного вещества, большое количество гидроморфных новообразований различного химико-минералогического состава [2]. Аллювиальные почвы, как правило, обладают более высоким плодородием по сравнению с зональными почвами. При нормированном внесении удобрений, поливе и соблюдении рациональной агротехники в пойменных хозяйствах Нечерноземной зоны России получают высокие урожаи: овощей – 50–60 т/га, картофеля – 25–27, кормовых корнеплодов – 50–

65, зеленой массы кукурузы – 50–70, моркови – 60–65, сена – 6–8 т/га [3].

Специфику аккумуляции и трансформации тяжелых металлов (ТМ) в аллювиальных почвах определяют особенности их генезиса, такие как нахождение в подчиненном ландшафте, действие аллювиального процесса, подстиление карбонатными породами. В пахотных почвах на данные процессы оказывают влияние водные мелиорации, внесение высоких доз минеральных и органических удобрений, средств химической защиты растений. Несмотря на незначительный объем, которые занимают аллювиальные почвы в структуре сельскохозяйственных угодий (4.9%) и пашни (0.6%) [4], их использование имеет особое значение в пригородах крупных городов. Например, более 85% овощных культур в Московской обл. размещено в поймах р. Оки, Москвы, Яхромы, Клязьмы, Дубны и др. Только из Яхромской поймы в Москву и область поступает ежегодно более 130 тыс. т овощей [3]. Однако в связи со зна-

чительной техногенной эмиссией вредных веществ, пригородные и городские аллювиальные сельскохозяйственные почвы должны быть объектами постоянного экологического мониторинга.

Цель работы — изучение содержания и распределения общего содержания и форм тяжелых металлов в аллювиальных почвах р. Упа в черте г. Тулы в зоне воздействия металлургического комбината.

Сопоставление содержания ТМ в атмосферных осадках и речном стоке, выполненное для Верхнеокского бассейна [5], показало, что в целом поступление Cu, Zn, Ni, Cd на изученной территории с атмосферными осадками почти в 2 раза меньше их выноса с речным стоком, а баланс свинца близок к нулю. Поступают ТМ в бассейн преимущественно в растворимой форме, а выносятся главным образом со взвешенным веществом. При этом региональные модули атмосферных выпадений Mn и Cu близки к глобальным, а модули выпадений Zn, Ni, Pb, Cd — в 1.5–3.0 раза больше глобальных. Проведенные ранее исследования показали, что в изученном районе ежегодно на 1 м² поверхности почвы может поступать с жидкими атмосферными осадками и пылью 1776–18263 мг Fe, 85–211 мг Mn, 115–222 мг Zn, 9.4–36.4 мг Ni, 11.4–92.5 мг Pb, 2.1–19.2 мг Cd [6].

Сравнение основных составляющих приходной части геохимического баланса ТМ на уровне типичного для изученной территории агропроизводственного ландшафта (поступление элементов с жидкими и твердыми осадками, удобрениями, без учета поступления с пожнивными остатками и опадом, посевным материалом, известковой мукой) с потерями микроэлементов за счет различных миграционных процессов также показало, что в целом сложившийся баланс — отрицательный, за исключением цинка. За счет специфических агрогенных источников ТМ в пахотные почвы возможно поступление на 1 м²: 256–542 мг железа, 28–53 мг марганца, 23–47.5 мг цинка, 2.3–4.6 мг никеля, 0.6–2.0 мг свинца и 0.05–0.23 мг кадмия. При этом поступление ТМ в агроландшафт составляло от 13% для Mn до 50–70% для остальных элементов от их суммарного выноса из агроценоза. В то же время с учетом вышеперечисленных недостающих статей баланс практически всех элементов, кроме железа, меди, свинца и частично никеля становился положительным. Для агроэкосистем, где выращивают зерновые, и технологическая эрозия отсутствует, баланс Cr, Ni и Zn положительный, Mn, Cu и Co — отрицательный, Pb — приблизительно нулевой, либо в отдельные годы положительный. Восполнение по-

терь ТМ в почве за счет внесения минеральных удобрений не превышает 15–35% от суммарных потерь агроэкосистемой [6].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение содержания, распределения и фракционного состава ТМ в аллювиальных луговых почвах проводили на 2-х участках в пойме р. Упы на окраине г. Тулы (Криволучье) (рис. 1). Один участок занят естественной луговой растительностью, местами периодически переувлажняется. Другой участок представлен сельскохозяйственной почвой, используемой для выращивания пропашных овощных культур. Участки расположены в непосредственной близости друг от друга, на расстоянии ≈3 км от металлургического комбината.

Смешанные образцы почв из различных слоев (0–20 см, 20–40 см и 40–60 см) отбирали методом конверта, из 5-ти точек — один образец. Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, освобождали от корней, пропускали через сито с диаметром ячеек 1 мм. Общие физические и химические свойства образцов почв (табл. 1) определяли с использованием стандартных методов, принятых в отечественном почвоведении [7]: гумус — по Тюрину, рН_{KCl} — потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность — по Каппену, подвижные фосфор и калий — по Кирсанову, поглощенные основания — по Блэку. Гранулометрический состав исследовали методом пипетки (вариант Качинского) с подготовкой почвы к анализу пирофосфатным методом по Долгову–Личмановой [7].

Пробоподготовку почв для определения общего содержания ТМ проводили по методу, описанному Гелетюк и Золотаревой [8] последовательной обработкой навески пробы концентрированными кислотами HF, HNO₃ и HCl после минерализации образца в муфельной печи. Извлечение подвижных форм ТМ осуществляли ацетатно-аммонийным буферным раствором рН 4.8 [7].

Экстракцию форм ТМ, связанных с различными компонентами почв (табл. 2), осуществляли по методу Тессьера [9]. Извлечение форм ТМ проводили в пластиковых центрифужных стаканах. Твердую и жидкую фазы после обработки соответствующим реагентом разделяли центрифугированием в течение 30 мин при скорости 10000 об./мин. После каждой экстракции оставшийся осадок промывали дистиллированной водой, после чего снова проводили центрифугирование и раствор удаляли. Определение концентраций ТМ в растворах проводили методом

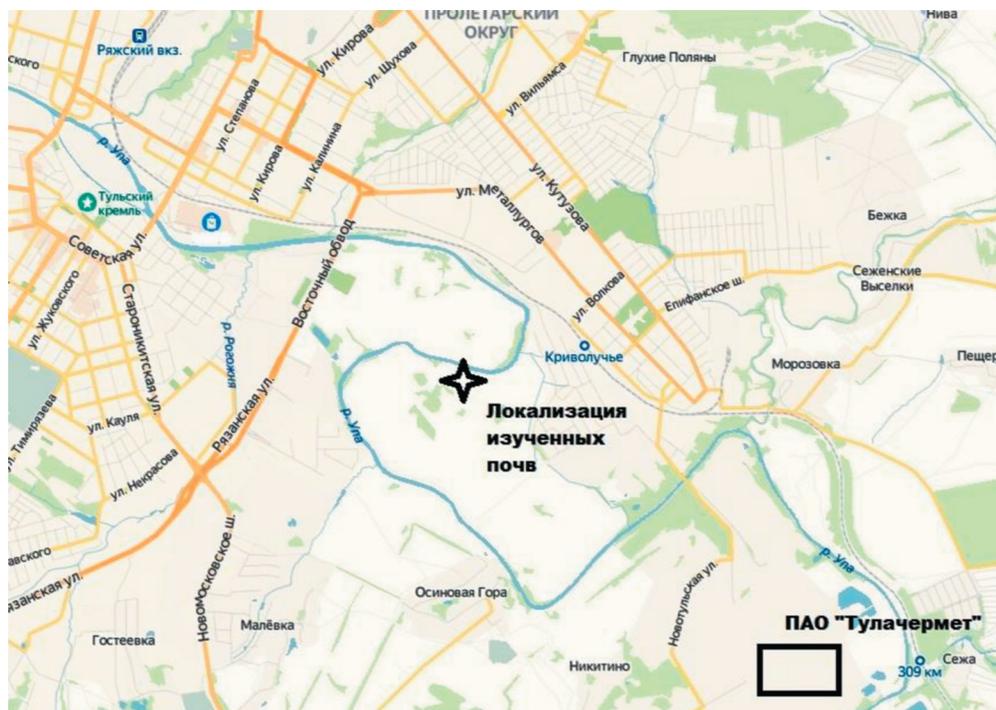


Рис. 1. Локализация изученных почв.

атомно-абсорбционной спектрофотометрии с плазменной и электротермической атомизацией проб.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение содержания ТМ в почвах Тульской обл. показало их повышенное содержание в почвах городов, в которых размещены крупные промышленные предприятия [10]. Для предприятий черной металлургии, характерных для г. Тулы, типоморфными металлами техногенной аномалии являются Ni, Mn, Pb, Cu, Zn. В промышленных узлах Тулы и Новомосковска плотность выпадения пыли и соответственно аэрозольный по-

ток ТМ превышает региональный фон более чем в 3 раза [5]. Наиболее контрастные геохимические аномалии в почвах г. Тулы характерны для элементов первого класса экологической опасности: Pb, Zn и Hg. Ореолы с максимальными уровнями загрязнения почв в основном находятся в правобережной части города и приурочены к промышленным предприятиям машиностроительного профиля и крупным транспортным магистралям [11].

Несмотря на то, что изученные пойменные участки находятся в непосредственной близости друг к другу, почвы под лугом по гранулометриче-

Таблица 1. Характеристика физико-химических свойств целинных и пахотных аллювиальных луговых почв р. Упа

Участок	Глубина	Гумус, %	рН _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na	K	Физ. песок, %	Физ. глина, %
				мг/100 г почвы		мг-экв/100 г почвы					
Пойма р. Упы, луг	0–20	6.8	7.3	1.3	6.0	60.00	2.70	0.82	0.37	40.8	59.2
	20–40	4.8	6.7	3.5	6.0	29.00	1.45	0.54	0.25	58.4	41.6
	40–60	2.9	6.8	4.0	8.1	25.50	1.23	0.52	0.30	56.6	43.4
Пойма р. Упы, пашня	0–20	3.8	7.4	27.5	14.5	38.00	2.92	0.24	0.46	65.1	34.9
	20–40	2.9	7.5	14.0	9.3	46.00	2.92	0.32	0.32	65.5	34.5
	40–60	3.5	7.4	3.8	6.0	48.00	2.70	0.34	0.25	63.3	36.7

Таблица 2. Схема последовательных селективных экстракций [9]

Последовательность экстракции	Название фракции	Экстрагент, условия экстракции
1	Обменная (Ex)	1 М MgCl ₂ (pH 7.0)
2	Связанная с карбонатами (экстрагируемая ацетатом натрия с pH 5 (для некарбонатных почв)) (AcNa)	1 М CH ₃ COONa (pH 5.0)
3	Связанная с оксидами/гидроксидами Fe и Mn (Ox)	0.04 NH ₂ OH · HCl + 25% (V) CH ₃ COOH (t = 96 ± 3°C)
4	Связанная в прочные комплексы с органическим веществом (Or)	HNO ₃ + H ₂ O ₂ (t = 85 ± 2°C)
5	Остаточная (Res)	HClO ₄ + HF

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в целинных и пахотных аллювиальных луговых почвах р. Упа (мг/кг)

Участок	Глубина	Mn _{вал}	Mn _{подв}	Fe _{вал}	Fe _{подв}	Pb _{вал}	Pb _{подв}	Zn _{вал}	Zn _{подв}	Cd _{вал}	Cd _{подв}	Ni _{вал}	Ni _{подв}
Пойма р. Упы, луг	0–20	760	128	33000	82	15.0	0.8	100	12	0.35	0.16	24.5	0.60
	20–40	600	14	22500	18	15.0	0.4	120	5	0.30	0.06	28.5	0.10
	40–60	700	10	25000	10	17.5	0.1	125	2	0.25	0.05	25.5	0.05
Пойма р. Упы, пашня	0–20	580	22	31500	22	15.0	0.5	225	13	0.40	0.13	27.5	0.05
	20–40	560	18	27000	30	15.5	0.5	115	11	0.35	0.11	22.5	0.05
	40–60	540	20	23500	44	15.0	0.5	95	23	0.25	0.08	21.0	0.30
ОДК [13]						130		220		2		80	
ПДК [14]		1500	100*, 140**	22300 [15]		32	6	100 [16]	23				4

*Для дерново-подзолистой почвы pH 6.0.

**Для чернозема.

скому составу являются тяжелыми суглинками, а пахотные – средними суглинками (табл. 1). В почвах естественного сложения наибольшее количество частиц физической глины отмечено для слоя 0–20 см, непосредственно подверженного аллювиальному процессу; с глубиной количество физической глины значительно уменьшается, приближаясь к верхней границе среднего суглинка. Гранулометрический состав пахотных почв является однородным по всей изученной глубине (0–60 см). С глубиной в почвах естественного сложения уменьшается количество гумуса и содержание обменных оснований, несколько снижается pH. В пахотных почвах в слое 0–60 см отмечено относительно равномерное распределение гумуса (с уменьшением в слое 20–40 см), кислотность практически не изменяется. Максимальное количество подвижного фосфора и обменного калия в сельскохозяйственной почве приурочено к пахотному горизонту (табл. 1). Данные закономерности изменения свойств почв в слое 0–60 см очевидно оказывают влияние на распределение ряда микроэлементов и их подвижных форм.

Слоистость почвенного профиля, различная степень гидроморфизма, поступление металлов с аллювием и горизонтальными потоками вещества, минеральными и органическими удобрениями, а также аэротехногенным загрязнением делает проблему изучения поведения ТМ в пойменных почвах весьма сложной. Зачастую просто невозможно однозначно ответить на вопрос о причине изменения в них концентраций ТМ.

Сравнение содержания ТМ в аллювиальных почвах и зональных серых лесных почвах на основе ранее полученных данных [12] показало, что пойменные почвы как в агроэкосистемах, так и под естественным ценозом, несмотря на их положение в геохимически подчиненном ландшафте, обеднены валовым марганцем по сравнению с серыми лесными почвами под дубравой. Общее содержание марганца в почвах под лугом несколько больше его содержания в пахотных почвах, причем на всех изученных глубинах (табл. 3). Это может быть обусловлено как его привнесением с техногенными выпадениями, так и активным участием в биологическом круговороте в естественных экосистемах. Показано обогащение зональных

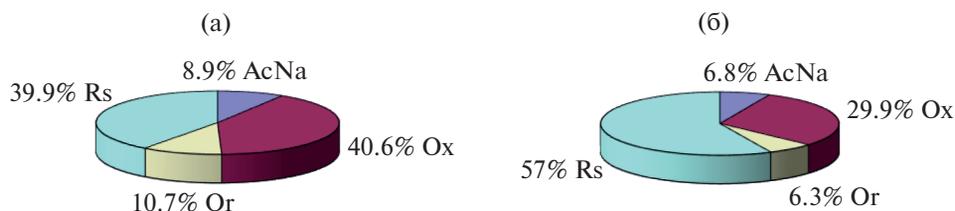


Рис. 2. Формы цинка в целинных и пахотных аллювиальных луговых почвах р. Упа: (а) – почва естественного сложения под лугом, (б) – пахотная почва; AcNa – фракция, связанная с карбонатами (экстрагируемая ацетатом натрия), Oх – фракция, связанная с оксидами/гидроксидами Fe и Mn, Or – фракция, связанная в прочные комплексы с органическим веществом, Res – остаточная фракция.

серых лесных почв марганцем под широколиственным лесом, причем значительная его часть (порядка 10%) находилась в подвижных формах [12]. В пахотных почвах как валовые, так и подвижные формы марганца распределены более равномерно. Уменьшение концентраций подвижного марганца в сельскохозяйственных почвах может быть обусловлено как его миграцией в более глубокие горизонты, так и латеральным выносом и отчуждением урожаем.

Железо является характерным элементом пойменных лугов и болот, который накапливается в растениях и энергично мигрирует в почвах и водах, концентрируется на окислительном барьере в верхнем горизонте почв [17]. Суммарное содержание железа в слое 0–60 см в естественных и пахотных почвах соизмеримо и максимально (превышало кларк) в слое 0–20 см. Максимальная аккумуляция железа в верхнем слое этих почв не зависела ни от содержания гумуса, ни от количества физической глины, ни от кислотности и могла быть обусловлена аэротехногенным привносом. В пахотных почвах в слое 0–40 см валовое железо распределено более равномерно. Количество подвижных форм железа максимально в верхнем слое естественных почв и уменьшалось с глубиной, в пахотных почвах оно, наоборот, возрастало с глубиной.

Содержание свинца как в пахотных почвах, так и в почвах под лугом на разных глубинах было одинаковым. Известно, что одним из основных источников свинца в городских почвах, удаленных от точечных источников его эмиссии, является автотранспорт. Исследованные участки находятся на значительном удалении от крупных автомобильных дорог города. Суммарный запас подвижных форм свинца в слое 0–60 см обеих почв соизмерим, но в пахотных почвах элемент распределен более равномерно.

Концентрация цинка как в почвах естественного сложения, так и в пахотных, находилась в целом в пределах ныне существующих ОДК, но превышала длительное время существовавшие

ПДК в нашей стране. Максимальное его содержание отмечено в пахотных почвах в слое 0–20 см и немного превышало ОДК. Это происходило, несмотря на более тяжелый гранулометрический состав и более высокое содержание гумуса почв под лугом, близкую кислотность. Источником цинка для пополнения остаточной фракции могут быть органические удобрения, техногенные поступления, а также наилок, приносимый во время половодий. Причем логично предположить, что во время половодий в пахотных почвах ввиду их лучшей водопроницаемости задерживается большее количество элемента. В почвах под лугом концентрации элемента с глубиной несколько увеличиваются, на пашне – уменьшаются с глубиной. Распределение подвижных форм элемента имеет противоположный характер и в слое 40–60 см в пахотных почвах достигает величины ОДК.

Для изучения роли отдельных компонентов почв в увеличении содержания цинка в почвах было проведено его фракционирование согласно методу Тессьера с соавторами [9] (рис. 2). Содержание элемента в обменной фракции было меньше уровня чувствительности прибора.

Наибольшее количество цинка в верхнем слое изученных почв находится в остаточной фракции и фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn. Во фракции, прочно связанной с органическим веществом, и экстрагируемой ацетатом натрия, находится приблизительно одинаковое количество элемента, независимо от характера использования почвы. Увеличение содержания цинка в верхнем горизонте пахотной почвы обусловлено значительным ростом его содержания в остаточной фракции. Металлы, входящие в состав данной фракции, представлены прочными соединениями в составе первичных и глинистых минералов и не способны переходить в почвенный раствор и поглощаться растениями. Тем не менее, высокие концентрации цинка в пахотной почве вызывают опасения и требуют детального и постоянного мониторинга за качеством выращиваемой на ней сельскохозяйственной продукции.

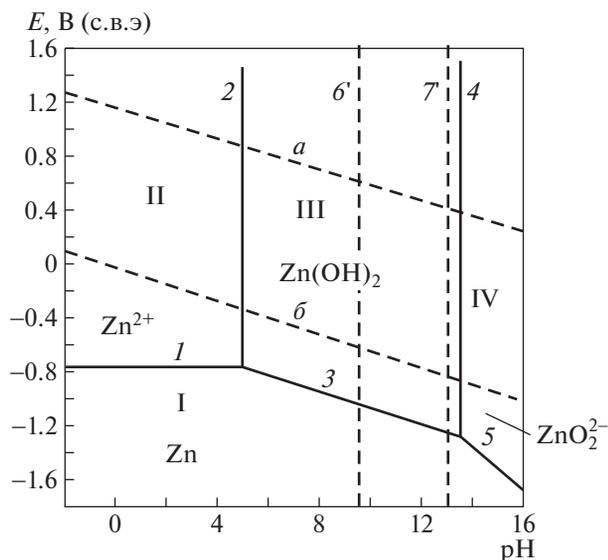


Рис. 3. Диаграмма E–pH для системы Zn–H₂O [18].

Диаграмма Пурбе для цинка (рис. 3) [18] демонстрирует, что при данных pH в диапазоне окислительно-восстановительных потенциалов, характерных для аллювиальных почв Центральной России, цинк может существовать как отдельная фаза в форме гидроксида. Однако в реальных почвенно-экологических условиях скорее всего возможно его соосаждение с гидроксидами железа и марганца, чем и обусловлено его высокое содержание в этой фракции. Изменения концентраций цинка во фракции, связанной с оксидами/гидроксидами железа и марганца, а также во фракции, связанной с органическим веществом, в пахотных почвах не происходило, однако доля этих фракций в пахотных почвах (в %) уменьшалась в связи с ростом общего содержания элемента за счет остаточной фракции.

Достаточно высокое содержание элемента во фракции, экстрагируемой ацетатом натрия при pH 5.0, может быть связано как со специфической адсорбцией цинка на органических и неорганических компонентах ППК, так и образованием труднорастворимых солей с карбонатами и фосфатами, которые растворяются при pH ≤ 5.0 [19]. Значительная роль фосфатов в иммобилизации цинка в интервале нагрузок 20–500 мг цинка/100 г почвы отмечена в работе [20].

Существенных различий в содержании валового кадмия и валового никеля между пахотными и естественными почвами не обнаружено, их концентрации находились в пределах установленных нормативов (табл. 3). В обеих почвах максимальные концентрации валового и подвижного кадмия были характерны для верхнего слоя и уменьшались с глубиной. Наибольшее количество по-

движных кадмия и никеля отмечено в наиболее гумусированном и тяжелом по гранулометрическому составу образце почвы. В пахотных почвах, в слое 0–40 см, в наибольшей степени подверженному сельскохозяйственному воздействию, содержание подвижного никеля было минимальным и выравненным по концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на нахождение на окраине крупного промышленного города в зоне действия металлургического комбината содержание большинства тяжелых металлов, за исключением Zn и Fe, в естественных и пахотных аллювиальных почвах находилось в пределах установленных нормативов и величин кларков, что могло быть обусловлено преобладанием выноса этих элементов над поступлением, что характерно в целом для баланса тяжелых металлов в этом регионе.

В верхнем слое естественной аллювиальной луговой почвы отмечены наиболее высокие среди природных и пахотных почв концентрации марганца и железа, что могло свидетельствовать об аккумуляции этих элементов из выпадений находящегося поблизости комбината черной металлургии. Также в верхнем слое почвы под лугом аккумулировалось наибольшее количество кадмия. В пахотной почве верхний слой содержал максимальные валовые количества всех элементов, за исключением свинца.

Максимальное количество подвижных форм всех элементов (за исключением цинка) наблюдали в верхнем слое почв естественного сложения, с наибольшим содержанием гумуса и физической глины среди всех изученных почв и pH_{KCl}, близким к нейтральному.

Сельскохозяйственное освоение изученных почв может служить причиной изменения характера распределения валовых и подвижных форм ряда элементов по профилю на глубину до 60 см, что чаще выражалось в наиболее равномерном их распределении. Для подвижных форм железа, цинка, никеля характерно вымывание в нижележащие горизонты пахотной почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабко П.Н., Хуснетдинова Т.И. Развитие учения о пойменном почвообразовании и проблемы классификации и эволюции пойменных почв // Экологическое почвоведение: этапы развития, вызовы современности. К 100-летию со дня рожд. Г.В. Добровольского / Под ред. Шобы С.А., Ковалевой Н.О. М.: ГЕОС, 2015. С. 84–94.
2. Добровольский Г.В., Афанасьева Т.В., Балабко П.Н., Федоров К.Н. Морфогенетические и режимно-экологические принципы классификации аллюви-

- альных почв // Почвы речных долин и дельт, их рациональное использование и охрана. Тез. Докл. Всесоюз. конф. М., Изд-во МГУ, 1984. С. 4–5.
3. Курматов А.А. Особенности свойств и режимов почв Москворецкой поймы: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: РУДН, 2004. 19 с.
 4. Романенко Г.А., Комов Н.В., Тютюнников А.И. Земельные ресурсы России, эффективность их использования. М.: РАСХН, 1996. 306 с.
 5. Золотарева Б.Н. Тяжелые металлы в почвах Верхнеокского бассейна // Почвоведение. 2003. № 2. С. 173–182.
 6. Учватов В.П. Природные и антропогенные потоки вещества в ландшафтах Русской равнины: Дис. ... д-ра биол. наук. Пушкино, 1994. 471 с.
 7. Агрохимические методы исследования почв. Изд-е 5-е. М.: Наука, 1975. 656 с.
 8. Гелетюк Н.И., Золотарева Б.Н. Использование метода беспламенной атомно-абсорбционной спектроскопии для анализа проб различных компонентов биосферы. Препринт. Пушкино, 1980. 25 с.
 9. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Analyt. Chem.* 1979. V. 51. № 7. P. 844–851.
 10. Арлянов В.А., Волкова Е.М., Нечаева И.А., Скворцова Л.С. Содержание тяжелых металлов в почве как индикатор антропогенного загрязнения Тульской области // *Изв. ТулГУ. Естеств. науки.* 2015. № 4. С. 194–204.
 11. Комиссаров М.С. Разработка системы мониторинга загрязнения почв тяжелыми металлами на территории Подмосковного угольного бассейна: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. Тула: ТулГУ, 2007. 24 с.
 12. Переломов Л.В., Пинский Д.Л. Формы Mn, Pb и Zn в серых лесных почвах Среднерусской возвышенности // *Почвоведение.* 2003. № 6. С. 682–691.
 13. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.7.2511-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с.
 14. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.7.2041-06, ГН 2.1.7.2042-06. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
 15. Предельно-допустимые концентрации химических веществ в почвах и предельные уровни их содержания по показателям вредности (по состоянию на 01.01.1991). М.: Госкомприрода СССР, № 02-2333 от 10.12.1990.
 16. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв сельтебных ландшафтов. Р. н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2013. 388 с.
 17. Добровольский Г.В. Поймы рек как ландшафты высокой плотности жизни и интенсивного почвообразовательного процесса // Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах. Л.: Наука, 1971. С. 226–231.
 18. Залкин В.М. О строении расплавов в бинарных металлургических системах с эвтектическими диаграммами состояния // *Журн. физ. химии.* 1972. Т. 46. № 1. С. 8–14.
 19. Dhillon S.K., Dhillon K.S. Zinc adsorption by alkaline soils // *J. Ind. Soc. Soil Sci.* 1984. V. 32. № 2. P. 250–252.
 20. Кудярова А.Ю., Семенюк Н.Н. Химические и микробиологические аспекты буферности серых лесных почв при загрязнении цинком // *Почвоведение.* 1999. № 2. С. 225–234.

Heavy Metals in Alluvial Meadow Soils of the Upa River in the Zone of Industrial Exposure

L. V. Perelomov^{a, #}, D. L. Pinsky^b, I. V. Perelomova^c, and Y. M. Atroschenko^a

^a Tula Lev Tolstoy State Pedagogical University
prosp. Lenina 125, Tula 300026, Russia

^b Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science RAS,
Institutskaya ul. 2, Moscow Region, Pushchino 142290, Russia

^c Tula State University, prosp. Lenina 92, Tula 300026, Russia

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

The concentration and depth distribution of a number of heavy metals in natural and arable alluvial meadow soils in the impact zone of the ferrous metallurgy plant was studied. The concentration of most heavy metals, with the exception of Zn and Fe, in the studied soils is within the established standards and clark values. There are highest concentrations of Mn and Fe in the upper layer of natural alluvial meadow soil that may indicate their accumulation from emission of the metallurgical plant. The top layer of the arable soil contains the maximum total amounts of all elements, with the exception of Pb. The highest concentrations of mobile forms of all elements (with the exception of Zn) are observed in the upper layer of the natural soil, which has the highest amount of humus and physical clay and a salt pH close to neutral. Agricultural use of alluvial soils can cause a change in the trends of the depth distribution of total and mobile forms of the elements along the profile.

Key words: heavy metals, alluvial meadow soils, Upa river, zone of industrial exposure.

УДК 632.112.1(470.345)

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРОДУКТИВНОЙ ЧАСТЬЮ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ¹

© 2020 г. С. В. Пугаев

Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства –
филиал Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
430904 Саранск, р.п. Ялга, ул. Мичурина, 5, Россия

E-mail: niish-mordovia@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2019 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

Изучено биологическое поглощение тяжелых металлов (ТМ) семенами сельскохозяйственных растений в разных почвах Республики Мордовия, которые по общим признакам и генезису объединены в агропочвенные районы: дерновоподзолистые почвы супесчаного гранулометрического состава – район I, район III – серые лесные почвы тяжелого гранулометрического состава; район IV – тяжелосуглинистые черноземы. Показан диапазон содержания ТМ в почвах районов, их вариабельность и достоверность различий. Характер аккумуляции металлов семенами был видоспецифичным, но имел и общие закономерности. На дерново-подзолистых почвах (район I) горох выделялся наибольшим содержанием Cu, озимая пшеница и ячмень – Ni, содержание всех ТМ в овсе было больше на серых лесных почвах (район III), на черноземах (район IV) было больше всего Pb в семенах гороха, в зерне озимой пшеницы – всех ТМ, кроме Pb. Содержание Co в семенах было низким и только в редких случаях, Sr – на уровне Co, но в семенах всех культур и во всех районах. Интенсивность поглощения ТМ из почв снижалась в зависимости от величины коэффициентов биологического поглощения (КБП) в ряду: серые лесные почвы > черноземы > дерново-подзолистые почвы. Наибольшие КБП были у Cu и Zn. Поглощение Ni было средним среди культур и интенсивнее Mn, растения минимально поглощали Pb, Fe, Sr и Co. Приведены ряды металлов по величине КБП в зависимости от почвы района и культуры.

Ключевые слова: тяжелые металлы, сельскохозяйственные растения, семена, почва, коэффициент биологического поглощения.

DOI: 10.31857/S000218812012008X

ВВЕДЕНИЕ

Агроэкологические особенности региона способствуют произрастанию многих дикорастущих и культурных растений, которые аккумулируют тяжелые металлы (ТМ) под влиянием эндогенных (особенности видов растений) и экзогенных факторов природного и антропогенного характера (свойств почв, агрохимических средств и металлов, климата, выбросов и др.) [1–3].

В соответствии с протяженностью Республики Мордовия (РМ) с запада на восток возрастает континентальность ее климата, который оказал влияние на растительность, почвообразователь-

ные процессы. Почвенный покров представлен почти 300 почвенными разновидностями, которые по одинаковым и близким по генезису характеристикам объединены в агропочвенные районы I, II, III, IV и V [4].

Было показано, что почвы агропочвенных районов значимо различаются по содержанию и уровню сопряженности ТМ, коэффициентам сходства количества сопряженных металлов, эколого-токсикологическим и санитарно-гигиеническим условиям. На основании этого было предложено распределение ТМ по почвам районов считать как геохимическое [5].

Поведение микроэлементов в биогеосистемах тесно связано с химическими процессами и процессами трансформации ТМ в почвах, их содер-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Мордовского НИИСХ – филиала ФАНЦ Северо-Востока по теме № 0744-2014-00053.

жание в окружающей среде постоянно увеличивается [6, 7], происходит постепенное изменение свойств почв из-за их загрязнения ТМ [8]. Металлы в почве находятся в разных формах, валовое содержание и степень подвижности которых не всегда определяют уровень ТМ в растениях [9, 10]. По мере роста и развития растений в них формируются пороги защиты от избытка ТМ на барьерах корня/стебель и стебель/зерно, и накопление ТМ происходит под генетическим контролем [11]. Механизмы, участвующие в процессах ограничения, намного слабее, чем те, что выработаны корнями для поглощения дефицитных микроэлементов [6]. Тем не менее, интегрированные реакции растений на стресс от ТМ усиливают действие защитных механизмов [12–14]. Передвижение ТМ происходит при синергическом и антагонистическом взаимодействиях [15].

Сформировавшийся в результате сложных процессов пул ТМ в органах растений, особенно в генеративных органах, определяет их функциональное состояние в вегетационном периоде и предопределяет прорастание и развитие зародыша семени [16]. Снижение накопления ТМ в посевах сельскохозяйственных культур обеспечивает качество растениеводческой продукции [17].

Содержание ряда ТМ было определено ранее в продукции растениеводства на отдельных почвах республики [18, 19], однако систематического изучения поведения ТМ в системе почва–семена разных культурных растений в сопоставимых условиях не проводили. Цель работы – изучение особенностей аккумуляции ТМ семенами сельскохозяйственных растений в разных агроэкологических условиях Мордовии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали районы I, III и IV с разной площадью и контрастными почвами, а также сельскохозяйственные виды растений, произраставшие в этих условиях. Район I характеризуется в основном серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами супесчаного и легкосуглинистого гранулометрического составов. Район III охватывает серые лесные почвы тяжелого гранулометрического состава. В районе IV преобладают выщелоченные и оподзоленные черноземы в сочетании с темно-серыми лесными тяжелосуглинистыми почвами [4].

Перечень исследованных сельскохозяйственных растений: рожь посевная озимая (*Secale cereale* L.), пшеницы озимая и яровая (*Triticum vulgare* L.), ячмень обыкновенный яровой (*Hordeum sativum* var. *distichon* Asch. et. Graebn.), овес посев-

ной (*Avena sativa* L.) и горох посевной (*Pisum sativum* L.).

Отбор проб почв на анализ проводили в репрезентативных точках агропочвенных районов I (13 площадок), III (7 площадок) и IV (17 площадок) по методике ЦИНАО [20]. Семена растений отбирали в послеуборочный период по методике [21]. Итого проанализировано 423 растительных и 1985 почвенных образцов на содержание ТМ, используя методики [22, 23].

Экспериментальные данные обработаны статистически с использованием программы STAT 3 по стандартным методикам при $P = 0.05$ в соответствии с [24], расчет коэффициентов биологического поглощения (КБП) – по [11]. Рисунки выполнены в Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Свинец. В семенах, отобранных на дерново-подзолистых почвах района I, количественное содержание металла выявлено только у ячменя. Пшеница яровая в этом районе не представлена из-за малых объемов выращивания. Зерно озимых культур из района III с серыми лесными почвами содержало Pb в 3 раза больше, чем из района IV с черноземами (рис. 1), что связано с промышленным насыщением района, но различия были недостоверными. Содержание свинца различалось в зерне овса и ячменя из этих районов достоверно. В горохе он был найден только в образцах, выращенных на черноземах района IV, и количественно больше, чем в семенах других культур из этого района. Коэффициент вариабельности содержания (C_V) Pb был $>100\%$, в том числе и у ячменя при его самой большой выборке, вероятно, из-за неравномерного загрязнения почв точечными источниками.

Таким образом, в зерне озимых культур и почвах районов отсутствовали достоверные отличия в содержании Pb, но они были получены для ячменя и овса из районов III и IV при очень высоких показателях C_V (табл. 1, 2).

Цинк. Zn был вторым среди ТМ по величине содержания в семенах изученных растений. Зерно озимых культур и овса имело значимые различия между районом I с дерново-подзолистыми почвами и районами III с серыми лесными и IV с черноземами, гороха – между районами III и IV. У гороха C_V Zn оказался минимальным в районе III и максимальным у овса в районе I, где все культуры выделялись высокими показателями C_V .

Таким образом, достоверность различий содержания Zn выявлена в семенах озимых и овса

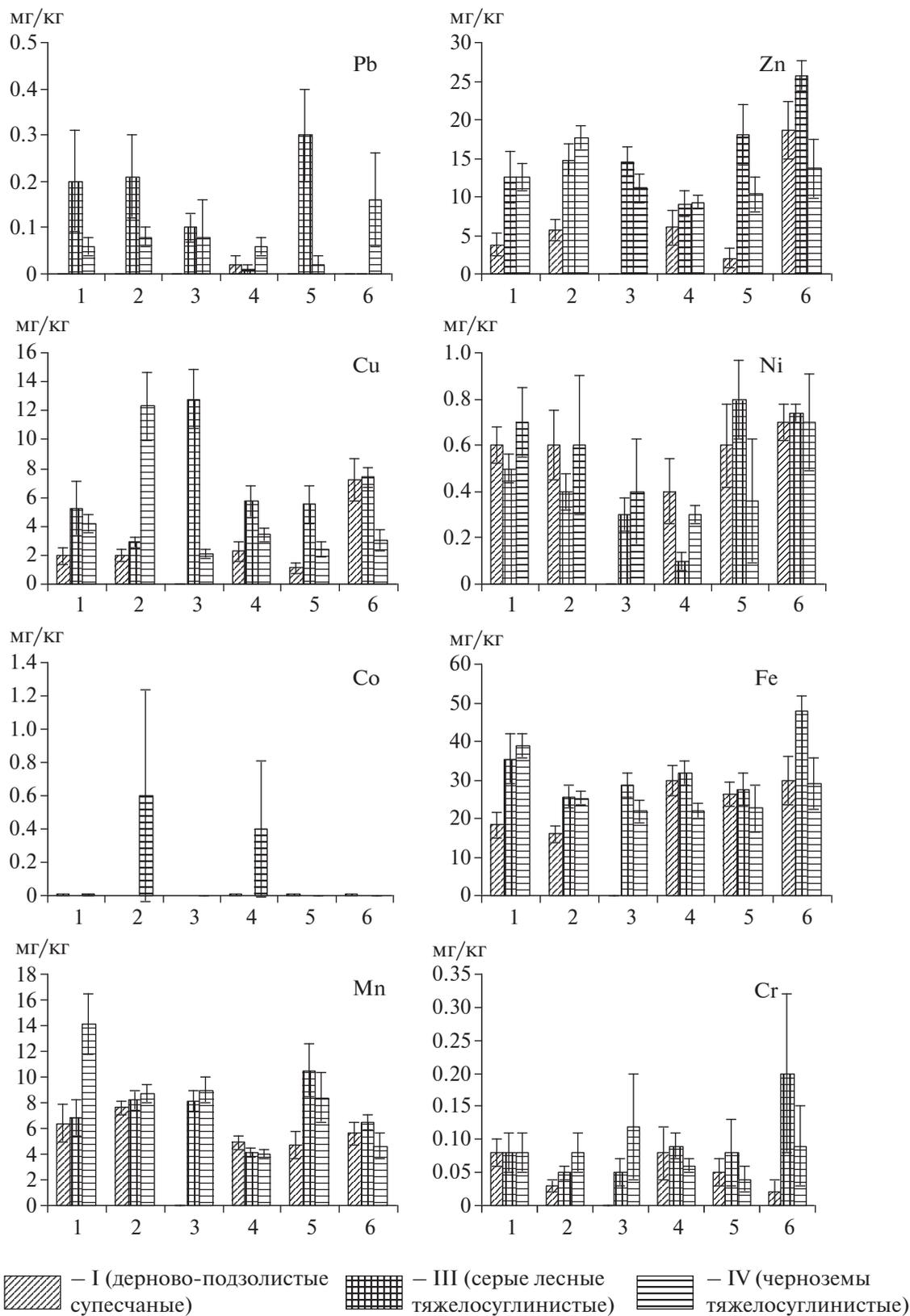


Рис. 1. Содержание ТМ в семенах культурных растений при выращивании на разных почвах, мг/кг: 1 – рожь озимая, 2 – пшеница озимая, 3 – пшеница яровая, 4 – ячмень, 5 – овес, 6 – горох. То же на рис. 2.

Таблица 1. Статистические характеристики содержания ТМ в почвах агропочвенных районов

Район	Количество проб, шт.	Показатель	Металлы							
			Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Fe ($\times 10^2$)	Mn	Cr
I	576	lim, мг/кг	0.0–115	7.0–170	1.0–188	1.0–93.0	1.0–76.0	37–990	324–5800	5.0–184
		C_V	72.1	42.5	104	52.8	90.3	34.7	38.2	32.2
III	467	lim, мг/кг	0.0–68.0	1.0–120	0.0–95	0.0–420	0.0–64.0	220–660	86.0–1010	26.0–157
		C_V	74.5	41.2	80.3	82.1	61.7	16.1	57.1	30.0
IV	942	lim, мг/кг	0–199	0–215	0–210	0–472	0–85.0	260–910	106–2530	11.0–154
		C_V	88.7	58.9	107	68.8	47.9	12.8	53.2	37.3
td			I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV	I/III, I/IV	I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV, III/IV	I/III, I/IV	I/III, I/IV, III/IV

Примечания. 1. I, III, IV – районы. 2. C_V – коэффициент вариации. 3. I/IV достоверные различия между районами (при $P = 0.05$).

на дерново-подзолистых почвах района I и почвах других районов, в семенах гороха – из районов III и IV, что было обусловлено, вероятно, максимальным содержанием металла в дерново-подзолистых почвах района I и значимыми различиями в его содержании между почвами районов (табл. 1).

Медь. Содержание Cu оказалось наиболее высоким в семенах растений, выращенных на серых лесных почвах района III, кроме озимой пшеницы. Ее зерно на черноземах района IV содержало металла достоверно больше, чем в районе I с дерново-подзолистыми почвами и в районе III с серыми лесными почвами. Район III отличался высоким содержанием Cu в зерне следующих культур: озимой ржи, в котором ее было в 3 раза больше, чем на дерново-подзолистых почвах района I, а также в зерне яровой пшеницы, значимо отличавшимся от зерна из черноземного района IV. Концентрации этого металла в ячмене и овсе из разных районов были очень близкими, но достоверно различались между районами, где вариабельность у ячменя была наименьшей: I и III, III и IV. Эту же закономерность выявили и для овса (табл. 2). Содержание Cu в горохе было одинаковым в районах I и III с дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами соответственно, и достоверно различалось по сравнению с образцами, выращенными на черноземах района IV с высоким плодородием, мощным гумусным слоем большой буферности.

Таким образом, содержание Cu оказалось практически одинаковым (2.1–4.2 мг/кг) в семенах культур, отобранных на черноземных почвах района IV, кроме озимой пшеницы. Однако содержание металла достоверно различалось у ози-

мых культур и гороха черноземов района IV, дерново-подзолистых почв района I и серых лесных почв района III почти у всех яровых. Следует отметить одинаковые различия, но противоположной направленности: в сторону увеличения (озимая пшеница) и снижения (яровая пшеница) между серыми лесными (район III) и черноземными почвами (район IV). Для Cu были схожим характер накопления металла и равновеликим его содержание в зерне озимой ржи, ячменя и овса, которое достоверно различалось для некоторых районов произрастания (табл. 2).

Никель. Содержание Ni различалось, но не достоверно, в зерне озимых культур и яровой пшеницы из районов с разными типами почв. Пшеница, ячмень и озимая рожь являются низкими Ni-накопителями, горох и овес – высокими [25]. Уровень содержания металла в зерне овса и ячменя, как у видов, противоположных по его поглощению, сильно различался в зависимости от района произрастания культур, но достоверно – у ячменя из районов I и III.

Таким образом, содержание Ni варьировало в семенах изученных культур в узком диапазоне (0.1–0.8 мг/кг) и достоверно различалось только у ячменя при высоких C_V семян и на дерново-подзолистых почвах из района I и серых лесных почвах района III.

Кобальт. Анализ показал, что содержание Co в семенах многих культур было меньше предела обнаружения методом анализа (**нпо**), в районе III – в семенах всех изученных культур. Кобальт обнаружен в семенах из района I с дерново-подзолистыми почвами, кроме озимой пшеницы, а также в зерне озимых и ячменя на черноземах района IV.

Таблица 2. Коэффициент вариации и достоверность различий содержания ТМ в семенах сельскохозяйственных растений агропочвенных районов

Район	Количество проб, шт.	Металлы, мг/кг							
		Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Mn	Cr
Рожь озимая									
I	17	—	159	121	57.9	282	75.2	93.2	107
III	12	178	92.5	125	37.7	—	62.7	69.4	134
IV	43	192	91.8	103	133	458	53.6	110	232
<i>td</i>		I/IV	I/III, I/IV	I/IV	0	0	I/III, I/IV	III/IV, I/III	0
Пшеница озимая									
I	26	—	115	100	135	—	70.7	33.1	162
III	21	194	63.5	54.8	99.2	—	52.9	44.4	93.4
IV	66	240	70.5	156	378	812	54.0	63.7	303
<i>td</i>		I/IV	I/III, I/IV	I/IV, III/IV	0	0	I/III, I/IV	0	0
Пшеница яровая									
III	20	157	59.8	71.1	95.5	—	50.3	438	172
IV	18	424	70.0	67.5	230	—	55.9	46.8	291
<i>td</i>		0	0	III/IV	0	0	0	0	0
Ячмень яровой									
I	17	412	156	129	129	412	53.8	44.4	188
III	28	529	100	103	154	—	53.1	49.5	113
IV	85	315	90.7	142	137	917	79.4	78.8	205
<i>td</i>		III/IV	0	I/III	I/III	0	III/IV	0	0
Овес									
I	16	—	265	148	128	400	46.7	89.9	163
III	13	134	77.6	86.6	71.5	—	57.4	69.7	142
IV	11	332	72.7	71.7	249	—	88.5	78.0	223
<i>td</i>		I/III, III/IV	I/III, I/IV	I/III, III/IV	0	0	0	I/III	0
Горох									
I	14	0	76.3	74.4	40.6	374	78.4	60.6	270
III	5	0	16.9	19.8	12.1	—	18.9	19.7	112
IV	11	209	92.4	81.6	93.1	—	76.3	73.2	222
<i>td</i>		0	III/IV	I/IV; III/IV	0	0	0	0	0

Примечания. 1. Прочерк – нет выборки. 2. I, III, IV – почвенные районы. 3. I/IV и 0 – достоверные и недостоверные различия между районами (при $P = 0.05$).

Величины концентраций имели самые большие C_V и недостоверные различия (табл. 2). Вероятно, это обусловлено легким гранулометрическим составом дерново-подзолистых почв района I, что повлияло на достаточно высокую миграцию Co в растения, а его накопление в семенах на черноземах района IV было связано с самым высоким содержанием в почве. Содержание Co в семенах оказалось одним из самых низких среди металлов, так же как и в почвах.

Железо. Содержание Fe в семенах культур было наиболее высоким, а показатель C_V – одним из

низких. Концентрации металла в зерне озимой пшеницы в районах произрастания были одинаковыми, но до 50% меньше, чем озимой ржи. Накопление металла в зерне озимых культур достоверно различались между районом I с дерново-подзолистыми почвами и районами III с серыми лесными и IV с черноземами. Концентрации Fe в зерне яровых зерновых и гороха были близкими: 21.8–31.6 мг/кг, а достоверно различались эти показатели у ячменя между районами III и IV.

Очень высокое содержание Fe в почвах, вероятно, и обусловило максимальное содержание в

семенах, которое достоверно различалось у озимых и ячменя в разных районах (табл. 2).

Марганец. Максимальное содержание Mn нашли в зерне озимой ржи на черноземах района IV (подвижность металла 6%) и овса в районе III с серыми лесными почвами (подвижность Mn 14%) [9]. Оно достоверно различалось в зерне озимой ржи на черноземах района IV, дерново-подзолистых почвах района I и серых лесных почвах района III, а также у овса из районов I и III. В зерне ячменя оно было везде самым низким и практически одинаковым.

Хром. Содержание Cr выявлено в семенах всех культур из всех районов, но оно оказалось самым низким из изученных ТМ, вероятно, из-за очень низкой подвижности металла ($\approx 2\%$). Достоверных различий не было обнаружено, вероятно из-за весьма высоких C_p , но в почвах они отмечены для всех районов (табл. 1, 2). Показано, что содержание Cr в зерне озимой ржи было одинаковым для всех районов.

Содержание ТМ в семенах сельскохозяйственных культур соответствовало, кроме единичных случаев, требованиям безопасности [26, 27]. Семян, достоверно различавшихся во всех районах содержанием каких-либо изученных ТМ, не отмечено. Не имело достоверных различий содержание Co и Cr в семенах всех культур, тогда как содержание этих металлов в почвах различалось во всех районах.

Содержание Ni в семенах ячменя и Mn в семенах овса, а также их содержание в почвах достоверно различалось в районах I и III.

В семенах ряда культур различия содержания ТМ отмечено только в образцах из районов III и IV: Pb – у овса и ячменя, Zn – у гороха, Fe – у ячменя, Cu – у яровой пшеницы (в почвах таких различий не выявлено). Достоверность различий содержания ТМ выявлена в основном в семенах озимых культур в большем количестве районов: I и III, I и IV, Zn – озимых и овса, Fe – озимых, содержания Pb, Zn и Fe в почвах – для всех районов. Районы I и IV, III и IV различались содержанием Cu в семенах озимой пшеницы, гороха и Mn – озимой ржи. Содержание этих элементов в почвах различалось только в районах I и IV.

Следовательно, аккумуляция металлов семенами не всегда была пропорциональна их содержанию в почве. Свинец активнее мигрировал в сопредельные системы в районах III и IV с более плодородными серыми лесными и черноземными почвами соответственно. Внутрипрофильная миграция Cu и Mn преобладала над их переходом в

растения в районе I с дерново-подзолистыми почвами [9].

По содержанию ТМ в семенах сельскохозяйственных растений и почве рассчитывали интенсивность их биопоглощения (КПБ) в разных агроэкологических условиях районов произрастания (рис. 2).

Наибольшие величины КБП на дерново-подзолистых почвах района I для семян гороха выявлены для Zn и Cu, минимальные – для Cr. Рожь озимая отличалась максимальным поглощением Ni, Co и Cr, ячмень – Fe и Pb (наличие металла выявлено только у этой культуры). Аккумуляция Zn и Cu семенами растений была одинакового порядка с максимальным поглощением элемента горохом, поглощение Ni было полностью одинаковым (кроме минимального у ячменя). Установлен убывающий ряд величин КБП металлов в районе I: Zn – горох > > пшеница озимая = ячмень > рожь озимая > овес; Cu – горох > пшеница озимая = ячмень > рожь озимая > овес; Ni – рожь озимая = пшеница озимая = овес = горох > ячмень; Co – рожь озимая > горох > > ячмень = овес > пшеница озимая; Fe – ячмень = горох > овес > рожь озимая = пшеница озимая; Mn – пшеница озимая > рожь озимая = горох > ячмень = овес; Cr – рожь озимая = ячмень > овес > > пшеница озимая > горох.

Семена озимых культур одинаково аккумулялировали Ni и Fe и максимально различались накоплением Co. Для семян овса и озимой пшеницы установлены минимальные КБП.

В районе III с серыми лесными почвами максимальные КБП были выявлены у яровой пшеницы для Cu и Fe, у гороха – для Zn, у ячменя – для Cr, у овса – для Pb, Ni, Mn, и ряд биоаккумуляции выглядел следующим образом:

Pb – овес > пшеница озимая > рожь озимая > > пшеница яровая > ячмень > горох; Zn – горох > > овес > пшеница озимая > пшеница яровая > > рожь озимая > ячмень; Cu – пшеница яровая > > горох > ячмень > овес > рожь озимая > пшеница озимая; Ni – овес > рожь озимая = горох > пшеница озимая > пшеница яровая > ячмень; Fe – пшеница яровая = овес > горох > рожь озимая > > ячмень > пшеница озимая; по Mn – овес > > пшеница озимая = пшеница яровая > рожь озимая > горох > ячмень; Cr – ячмень > горох > > рожь озимая = овес > пшеница озимая = пшеница яровая.

У обеих форм пшеницы было одинаковым аккумулялирование Mn и Cr, а противоположной направленности – Cu и Fe, причем у яровой – в большую сторону. Аккумуляция остальных металлов (Pb, Zn, Ni) озимой пшеницей была боль-

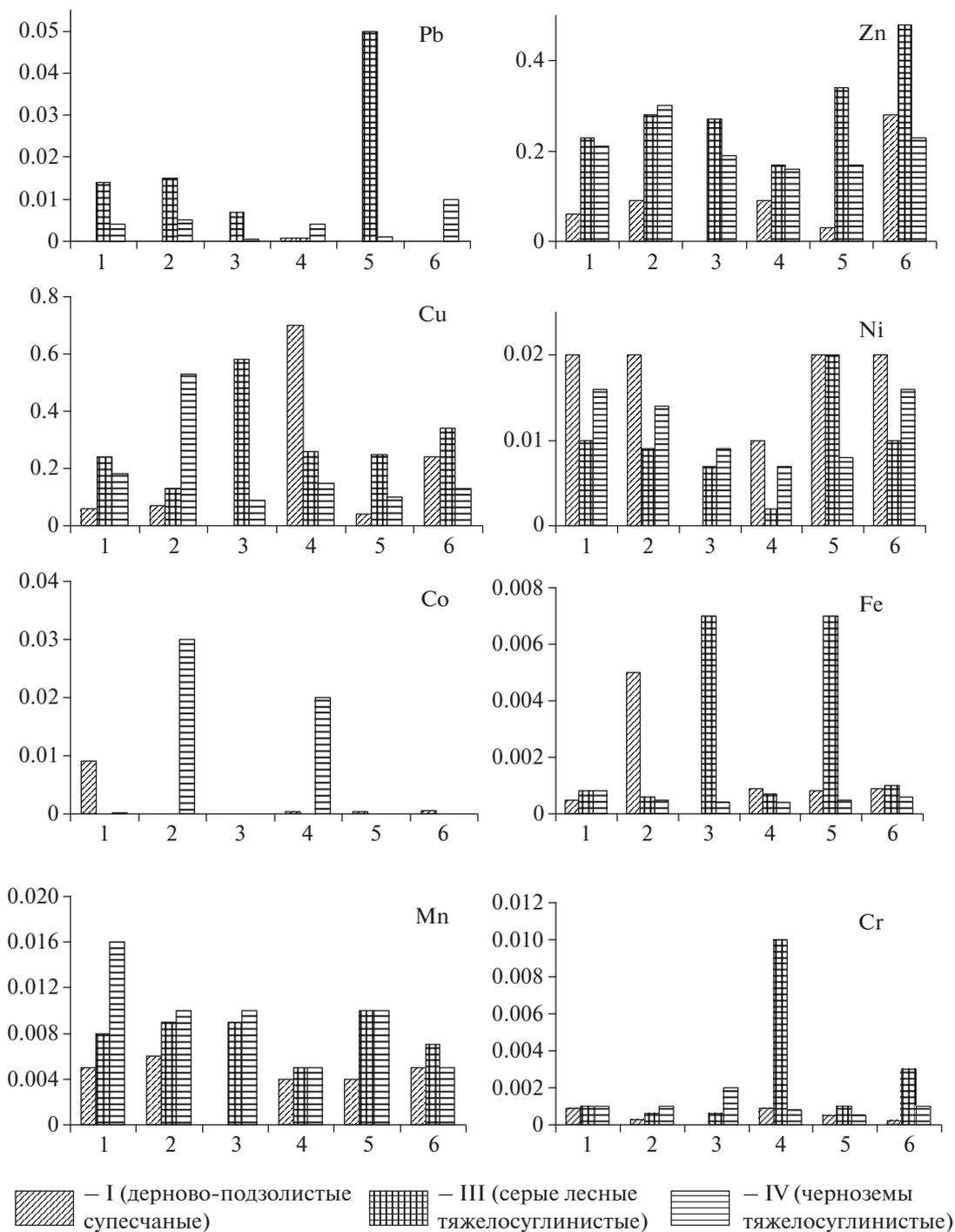


Рис. 2. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) ТМ семенами культурных растений на разных почвах.

ше, чем яровой. У ячменя часто отмечено минимальное биопоглощение ТМ (Zn, Ni и Mn).

Семена гороха, выращенного на черноземах района IV интенсивно аккумулировали Pb, пшеницы озимой – Zn, Cu, Co, яровой – Cr, семена озимой ржи повышено поглощали Ni, Fe и Mn. В наименьшей степени семенами яровой пшени-

цы накапливались Pb, Cu, Co, Fe, ячменя – Zn, Ni, Fe и Mn, гороха – Co и Mn; овса – Co и Cr. Интенсивность поглощения Mn различалась среди семян культур района IV меньше других металлов в ряду убывающих величин КБП: Pb – горох > > пшеница озимая > рожь озимая = ячмень > овес > > пшеница яровая; Zn – пшеница озимая > горох >

Таблица 3. Соотношение коэффициентов биологического поглощения ТМ семенами сельскохозяйственных культур в агроэкологических условиях агропочвенных районов

Агропочвенные районы		
I	III	IV
Озимая рожь		
Zn = Cu > Ni > Co > Mn > Cr > Fe > Pb	Cu > Zn > Pb > Ni > Mn > Cr > Fe > Co	Zn > Cu > Ni = Mn > Pb > Cr > Fe > Co
Озимая пшеница		
Zn > Cu > Ni > Mn > Fe > Cr > Pb = Co	Zn > Cu > Pb > Ni = Mn > Fe = Cr > Co	Cu > Zn > Co > Ni > Mn > Pb > Cr > Fe
Яровая пшеница		
–	Cu > Zn > Mn > Pb = Ni = Fe = Cr > Co	Zn > Cu > Mn > Ni > Cr > Pb > Fe > Co
Ячмень		
Zn > Cu > Ni > Mn > Fe = Cr > Pb > Co	Cu > Zn > Cr > Mn > Ni > Pb = Fe > Co	Zn > Cu > Co > Ni > Mn > Pb > Cr > Fe
Овес		
Cu > Zn > Ni > Mn > Fe > Cr > Co > Pb	Zn > Cu > Pb > Ni > Mn > Fe > Cr > Co	Zn > Cu > Mn > Ni > Pb > Fe = Cr > Co
Горох		
Zn > Cu > Ni > Mn > Fe > Co > Cr > Pb	Zn > Cu > Ni > Mn > Cr > Fe > Pb = Co	Zn > Cu > Ni > Pb > Mn > Cr > Fe > Co

> рожь озимая > пшеница яровая > овес > ячмень; Cu – пшеница озимая > рожь озимая > ячмень > горох > овес > пшеница яровая; Ni – рожь озимая = горох > пшеница озимая > пшеница яровая > овес > ячмень; Co – пшеница озимая > ячмень > рожь озимая > пшеница яровая = овес = горох; Fe – рожь озимая > горох > пшеница озимая = овес > пшеница яровая = ячмень; Mn – рожь озимая > пшеница озимая = пшеница яровая = овес > ячмень = горох; Cr – пшеница яровая > рожь озимая = пшеница озимая = горох > ячмень > овес.

При сравнении двух форм одной культуры отмечено, что зерно озимой пшеницы характеризовалось максимальным аккумулярованием Cu, яровой – минимальным, но одинаковым – Mn.

Обобщенные ряды величин КБП представлены в табл. 3. Первые два места принадлежали Zn и Cu у всех культур, Ni был на третьем месте: в районе I с дерново-подзолистыми почвами, а также в районе III с серыми лесными – у семян гороха, в районе IV с черноземами – у озимой ржи и гороха. Степень поглощения Mn была средней величины. Семена всех культур имели минимальный КБП в районе I с дерново-подзолистыми почвами для Co и Pb, в районе III с серыми лесными – для Co и Cr, в районе IV с черноземами – для Fe и Co. Повышенное накопление Cu и Zn семенами культурных растений отмечали в работах [28, 29].

Содержание Mn, Zn, Cu, Ni и Co в почве районов было в 1.5–2.0 раза меньше ОДК [30], поэтому, вероятно, может быть перспективным их использование в качестве микроудобрений, т.к. они

являются биофильными металлами, важность которых для растений [16] подтверждена их высокой степенью поглощения (кроме Co) и исследованиями некоторых из этих микроэлементов [31, 32]. Кроме прибавки урожая, Zn, являясь антагонистом Cd, токсиканта I-й группы опасности [26], препятствует его поглощению семенами культурных растений [33]. Содержание Cd в продукции растениеводства можно снижать при помощи некоторых других из упомянутых микроэлементов [34–36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, семена сельскохозяйственных растений различались по накоплению тяжелых металлов (ТМ), вариабельности содержания и интенсивности поглощения в разных агроэкологических условиях и почвах агропочвенных районов. ТМ группируются по величинам содержания в семенах следующим образом: группа I – 30–60 мг/кг (Fe); группа II – от 4.0–8.0 до 12.0–25.0 мг/кг (Zn, Cu и Mn); группа III – 0–0.8 мг/кг (Pb, Co, Ni и Cr). На дерново-подзолистых почвах с легким гранулометрическим составом (район I) семена культур не выделялись среди других районов по содержанию ТМ, но в районе горох выделялся содержанием Cu, озимая пшеница и ячмень – Ni, на серых лесных почвах тяжелосуглинистого гранулометрического состава (район III) в семенах овса содержание всех ТМ и некоторых яровых культур ряда металлов было максимальным. В районе IV с черноземами семена озимых зерновых опережали по накоплению ТМ другие

культуры (пшеница – всех ТМ, кроме Pb, рожь – Mn и Ni), горох – Pb.

Выявленная изменчивость семян культурных растений по составу ТМ свидетельствовала о существенном влиянии агроэкологических факторов, в частности типов почв агропочвенных районов, влияние которых было сильнее генетически обусловленного контроля накопления ТМ. В результате механизмы ограничения поглощения ТМ оказывались слабее механизмов поглощения дефицитных микроэлементов.

Коэффициенты вариации содержания Pb, Co и Cr всегда были >100%, при этом достоверно не различалось содержание Co и Cr в семенах культур из всех районов, содержание Pb – в 2/3 случаев сравнений между районами. Основные различия концентраций выявлены у озимых культур, у яровых – из районов III и IV с более плодородными почвами.

По интенсивности поглощения семена растений различались как по видам, так и в пределах одной культуры из разных почвенных районов. Наибольшей степенью поглощения отличались во всех районах Zn и Cu, средней интенсивностью – Ni и Mn, минимально семена накапливали Pb, Fe, Cr и особенно Co. Величины КБП ТМ можно использовать как дополнительный элемент прогнозирования потребности растений в микроэлементах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Силаева Т.Б.* Состояние растительного мира Мордовии // Интеграция образования. 2000. № 2. С. 48–52.
2. *Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.Н., Лайдинен Г.Ф.* Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карел. науч. центр, 2007. 170 с.
3. *Бахмаков Д.И., Лукаткин А.С.* Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 236 с.
4. *Осичкин А.Ю., Ахметов Ш.И., Кононова Г.М., Додонов И.А.* Классификация, свойства, бонитировка и охрана почв Республики Мордовия / Под ред. Ахметова Ш.И. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. 108 с.
5. *Пугаев С.В.* Геохимическое районирование пахотных почв Республики Мордовия по содержанию тяжелых металлов // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 3. С. 28–32.
6. *Кабата-Пендиас А.* Проблемы современной биогеохимии микроэлементов // Росс. хим. журн. 2005. Т. 69. № 3. С. 15–19.
7. *Baron S., Carignan J., Plogiun A.* Dispersion of heavy metals (metalloids) soils from 800 year old pollution (Mont Lotere, France) // Environ. Sci. Technol. 2006. V. 40. P. 5319–5326.
8. *Гукалов В.Н., Савич В.И., Трифонова Н.А.* Поэтапное изменение свойств почв при загрязнении их тяжелыми металлами // Плодородие. 2015. № 1. С. 42–44.
9. *Пугаев С.В.* Содержание и транслокация поллютантов в компонентах антропогенно измененных биогеоценозов в условиях Республики Мордовия: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2013. 23 с.
10. *Пугаев С.В., Лукаткин А.С.* Накопление тяжелых металлов в почве и листовом аппарате растений дендрария Ботанического сада Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва // Агрохимия. 2015. № 5. С. 82–89.
11. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
12. *Ali H., Khan E., Iahi I.* Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation // J. Chem. 2019. V. 2019, Article ID 6730305.
13. *Bücker-Neto L., Paiva A.L.S., Machado R.D., Arenhart R.A., Margis-Pinheiro M.* Interactions between plant hormones and heavy metals responses // Genet. Mol. Biol. 2017. V. 40(1 Suppl 1). P. 373–386.
14. *Sytar O., Kumari P., Yadav S., Brestic M., Rastogi A.* Phytohormone priming: Regulator for heavy metal stress in plants // J. Plant Growth Regul. 2019. V. 38. P. 739–752.
15. *Зубкова В.М., Демин В.Н.* Роль корней при поступлении тяжелых металлов в растения в условиях повышенной концентрации их в почве // Докл. РАСХН. 2004. № 1. С. 23–26.
16. *Андреева И.В., Говорина В.В., Виноградова С.Б., Ягодин Б.А.* Никель в растениях // Агрохимия. 2001. № 3. С. 82–94.
17. *Noulas C., Tziouvalekas M., Kariotis T.* Zinc in soils, water and food crops // J. Trace Element. Med. Biol. 2018. V. 49. P. 252–260.
18. *Пугаев С.В.* Содержание ТМ в продукции зерновых и зерно-бобовых культур на почвах разных типов // Освоение адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Мат-лы Всеросс. науч.-практ. конф. Ульяновский НИИСХ, 6–8 июля 2010 г. С. 174–179.
19. *Кудашкин М.И.* Медь и марганец в агроландшафтах юга Нечерноземья. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 329 с.
20. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
21. Универсальные правила отбора проб растениеводческой продукции. М.: Агропромиздат, 1987. 198 с.
22. Методика определения тяжелых металлов в растительном сырье. МВИ ЭС № 883-93. СПб.: НПО “Спектрон”, 1993. 25 с.
23. Методика определения содержания металлов в поршковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. СПб.: НПО “Спектрон”, 1994. 11 с.
24. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 423 с.

25. Барсукова В.С., Гамзикова О.И. Влияние избытка никеля на элементный состав контрастных по устойчивости к нему сортов пшеницы // *Агрохимия*. 1999. № 1. С. 80–85.
26. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Сан-ПиН 2.3.2.1078-01. М.: Интер СЭН, 2002. 51 с.
27. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных. М.: Глав. управл-е ветеринарии Госагропрома СССР, 1987. 3 с.
28. Кашин В.К., Убугунов Л.Л. Особенности накопления микроэлементов в зерне пшеницы в Западном Забайкалье // *Агрохимия*. 2012. № 4. С. 68–76.
29. Кашин В.К. Особенности накопления микроэлементов в зерне овса в Западном Забайкалье // *Агрохимия*. 2013. № 10. С. 56–65.
30. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах (Дополнения №1 к перечню ПДК и ОДК № 6229-91): Гигиенические нормативы. М.: Информ.-издат. центр Госсанэпиднадзора России, 1995. 8 с.
31. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Эффективность комплекса агрохимических средств в зернотравяно-пропашных севооборотах // *Агрохимия*. 2016. № 7. С. 44–51.
32. Пугаев С.В. Влияние агротехнологических приемов на накопление тяжелых металлов озимой пшеницей на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 70–77.
33. Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Анисимова Л.Н., Гераськин С.А., Дикарев Д.В., Фригидова Л.М., Фригидов Р.А., Белова Н.В. Оценка миграционной способности и фитотоксичности Zn в системе почва–растение // *Агрохимия*. 2013. № 1. С. 64–74.
34. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Способ оптимизации содержания кадмия и кобальта в зерне озимой пшеницы. Пат. 2633777, РФ, от 22.03.16, А01С 1/00 (2006.01). Б.И. 2018. № 5. 6 с.
35. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Способ снижения содержания кадмия в зерне озимой пшеницы (2 формулы) Пат. 2648704, РФ, от 24.03.16. А01С 1/00 (2006.01). Б.И. 2018. № 10. 7 с.
36. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Способ снижения содержания кадмия в зерне озимой пшеницы. Пат. 2632083, РФ, от 22.03.16. А01С 1/00 (2006.01). Б.И. 2018. № 4. 5 с.

Peculiarities of Heavy Metals Accumulation in Productive Part of Crop Plants in Different Agro-Ecological Conditions of the Republic of Mordovia

S. V. Pugaev

*Mordovia Research Institute of Agriculture—Branch of the N.V. Rudnitsky
Federal Agricultural Research Center of the North-East
ul. Michurina 5, r. p. Yalga, Saransk 430904, Russia*

E-mail: niish-mordovia@mail.ru

The biological uptake of heavy metals (HM) by seeds of agricultural plants in different soils of the Republic of Mordovia, which by common characteristics and Genesis are United in agro-soil areas: sod-podzolic soils of sandy loam granulometric composition-district I, district III – gray forest soils of heavy granulometric composition; district IV – heavy loamy chernozems. The range of HM content in the soils of the districts, their variability and reliability of differences are shown. The nature of the accumulation of metals by seeds was species – specific, but it also had General patterns. On sod-podzolic soils (district I), peas were distinguished by the highest content of Cu, winter wheat and barley – Ni, the content of all HMS in oats was higher on gray forest soils (district III), on chernozems (district IV) there was the most Pb in pea seeds, in winter wheat grain – all HMS except Pb. The Co content in the seeds was low and only in rare cases, Cr – at the Co level, but in the seeds of all crops and in all areas. The intensity of TM absorption from soils decreased depending on the value of the biological absorption coefficients (BAC) in the series: gray forest soils > chernozems > sod-podzolic soils. Cu and Zn had the highest CBP. Ni uptake was average among crops and more intense than Mn; plants minimally absorbed Pb, Fe, Cr, and Co. The series of metals by the value of BAC depending on the soil of the area and culture are given.

Key words: heavy metals, agricultural plants, seeds, soil, biological absorption coefficient.

УДК 551.58:632.3/4

ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ФИТОПАТОГЕНЫ И РАЗВИТИЕ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ

© 2020 г. А. Н. Игнатов^{1,2}, Е. И. Кошкин^{3,*}, И. В. Андреева³, Г. Г. Гусейнов⁴,
К. Г. Гусейнов⁵, Ф. С.-У. Джалилов³

¹ Исследовательский центр ООО “ФитоИнженерия”
141880 Московская обл., с. Рогачево, ул. Московская, 58/8, Россия

² Российский университет дружбы народов
117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
127550 Москва Тимирязевская ул., 49, Россия

⁴ Группа компаний “НН group”
AZ1102 Баку, шоссе Хырдалан-Бинагади, 34Н, Азербайджанская Республика

⁵ Институт защиты растений и технических культур
AZ1100 Гянджа, ул. Азиза Алиева, 91, Азербайджанская Республика

*E-mail: ekoshkin@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 30.06.2020 г.

После доработки 10.07.2020 г.

Принята к публикации 11.09.2020 г.

В обзоре рассмотрены возможные тенденции изменения распространения и вредоносности фитопатогенов в мире при различных сценариях изменения климата. Проанализированы влияние повышенной температуры, концентраций двуокси углерода и озона в отделиности и в сочетании на распространение и вредоносность фитопатогенов.

Ключевые слова: климатические изменения, фитопатогены, болезни растений, переносчики.

DOI: 10.31857/S0002188120120042

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, ведущих к негативным переменам в сельскохозяйственном растениеводстве, являются глобализация сельскохозяйственного производства, в первую очередь, семеноводства и производства посадочного материала вегетативно размножаемых культур, а также климатические изменения, способствующие ослаблению иммунитета растений, усилению вредоносности и распространенности патогенов и их переносчиков [1–3], снижению устойчивости полевых культур к абиотическим [4] и биотическим [5] факторам.

Согласно данным, представленным в 5-м обобщающем докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата, с 1880 по 2012 г. усредненная температура поверхности суши и океана повысилась на 0.85°C [6]. Увеличение средней годовой температуры от доиндустриального уровня превысит 1.5°C к 2100 г. в самом лучшем случае (IPCC), а в экстремальном – изменение составит от 2.6 до 4.8°C [7].

Одновременно концентрация в атмосфере CO₂ увеличится с 390 ppm до 500 ppm (A1B emission scenario) или даже 1000 ppm (A1FI emission scenario) к концу 21 века [8]. Также возрастет содержание других парниковых газов и снизится содержание кислорода, изменится направление струйных течений в атмосфере [9].

Сельское хозяйство в наибольшей степени подвержено влиянию происходящих климатических изменений, однако негативные последствия могут сочетаться с позитивными. В частности, повышение температуры на 1°C в России может сместить зону интенсивного растениеводства на север на 300 км (“осевнение” сельского хозяйства). Вместе с тем климатические изменения могут вызвать целый ряд новых аспектов во взаимоотношениях растений, фитопатогенов и прочих компонентов системы патогенеза.

“Зеленая революция” привела к значительному увеличению мировой сельскохозяйственной продукции за счет выведения более продуктивных сортов растений, расширения орошения,

массового применения удобрений, пестицидов, современных технологий обработки почвы. Производственная база сельского хозяйства в последние годы является крайне нестабильной на фоне признаков истощения подземных вод, загрязнения окружающей среды и утраты биоразнообразия, что свидетельствует о конце модели “зеленой революции” в ее традиционном виде. Выход видится в переходе на экологически чистое сельское хозяйство, с использованием естественных экосистемных процессов [10]. В развитых странах уже давно уделяют главное внимание устойчивому развитию растениеводства – сохранению устойчивого производства для продовольственной безопасности страны в долгосрочной перспективе, несмотря на риски изменения климата, обеспеченности аграрного сектора химическими удобрениями и пестицидами. Основной путь к решению экологических проблем, вызванных сельскохозяйственным производством, – повышение культуры земледелия, которое включает точное земледелие (цифровизацию производства), почвозащитное земледелие (минимальная эрозия и сохранение плодородия почв), органическое сельское хозяйство (минимальное применение химических удобрений и пестицидов), использование биотехнологии в селекции (генная инженерия, маркерная селекция и геномное редактирование) и размножении (искусственные семена) сельскохозяйственных растений, рациональную и безопасную химизацию (регуляторы роста, микроэлементы, безопасные для человека пестициды) и биологизацию защиты растений (микроорганизмы-антагонисты, стимуляторы роста и иммунитета растений). Общая черта новых технологий – “интеллектуальность” их реализации, и более высокая цена ошибки при их применении.

В настоящем обзоре проанализированы возможные тенденции воздействия глобального потепления на фитопатогенные организмы, развитие болезней сельскохозяйственных культур и влияние на них отдельных факторов (CO_2 , O_3 и других) глобальных изменений климата.

ФАКТОРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА БОЛЕЗНИ РАСТЕНИЙ

Повышение среднегодовой температуры воздуха влияет на продолжительность вегетационного периода, периода снежного покрова, частоту заморозков, минимальные и максимальные дневные и ночные температуры, а также на частоту и интенсивность экстремальных погодных явлений. Минимальные и максимальные температурные экстремумы важны с точки зрения выжива-

ния фитопатогенов в зимний период и повреждения растений во время вегетации [4, 11, 12]. Потепление климата и повышение концентрации парниковых газов будут сопровождаться проникновением в агрофитоценозы инвазивных видов патогенов [13, 14] и дальнейшим их быстрым распространением [15–17].

Функционирование патосистемы (растения + фитопатогены) в агрофитоценозах зависит от множества факторов, которые необходимо учитывать при составлении прогноза вредоносности возбудителей болезней. Возможно выделить следующие факторы абиотического и биотического характера, влияющие на популяции фитопатогенов:

1) прямое воздействие на фитопатогены (показатели выживания, распространения, заражения растений, развития болезни, размножения патогена, параметры температуры (средние и экстремальные величины), влажности воздуха, солнечного излучения (особенно УФ-В), количества и состава осадков, состава атмосферного воздуха (двуокись углерода, кислород, озон), силы и направления ветра);

2) косвенное воздействие на фитопатогены через растение-хозяина (пути проникновения в растение, стрессы, проявление неспецифического и специфического иммунитета);

3) косвенное воздействие через другие организмы: переносчики, растения-резерваты, микробиоту, состояние эпифитной и ризосферной ниши обитания, антагонисты, конкуренты, вторичные патогены;

4) “расконсервация” патогенов в тающих ледниках и вечной мерзлоте;

5) появление новых маршрутов переноса патогенов международной торговлей (локализация производства семян и посадочного материала в новых регионах), воздушными массами, в т.ч. в меридианном направлении;

6) влияние на технологию защиты растений (эффективность пестицидов, смыв их осадками с поверхности растений, проницаемость кутикулы растений для системных пестицидов, скорость метаболизма в растениях и микробного разложения растительных остатков в почве в почве).

ФАКТОРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ

Температура. Температура является ключевым фактором патогенеза. Однако особенности проявления иммунитета растений при различных

температурах, и в особенности при циклических (день/ночь) ее изменениях остаются слабо изученными. Показаны существенные сдвиги в активности 2-х основных механизмов устойчивости – стимулированного консервативными структурными элиситорами (pattern-triggered immunity (*PTI*)) и опосредованного белками – эффекторами патогена (effector-triggered immunity (*ETI*)). Иммуные реакции растения, вызванные *ETI*, проявляются быстрее в диапазоне низких температур (10–23°C), в то время как *PTI* стимулирует иммуные реакции при температуре от 23 до 32°C. Изменения температуры провоцируют быструю коэволюцию механизмов устойчивости растения и вирулентности фитопатогенов [18]. Субоптимальная температура часто приводит к активизации мобильных генетических элементов в растении, затрагивая гены устойчивости [19].

Рост температуры часто ингибирует проявление устойчивости растения на различных стадиях каскада защитных реакций. Показано, что гены устойчивости растения, кодирующие белки класса *NB-LRR*, оказываются наиболее чувствительными к повышению температуры. Растения семейства Капустные, включая *Arabidopsis* и *Brassica oleracea*, были намного восприимчивее к *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* и *Xanthomonas campestris* при 28°C чем при 20–22°C [20, 21]. Аналогично этому, при 28–33°C резко снижалась устойчивость растений, контролируемая главными генами устойчивости к вирусу мозаики табака (*TMV*), нематод (root-knot nematode), мучнистой росе томата, возбудителю оливковой пятнистости томата *Cladosporium fulvum* [22].

Например, при равных физических и химических параметрах почвы, высокие температуры провоцируют ускоренный рост растений, что приводит к меньшему содержанию в тканях кальция и микроэлементов [23] и высокой восприимчивости к болезням [24]. Повышение температуры в ночное время снижает синтез вторичных метаболитов в растении, которые играют одну из главных ролей в активном иммунитете, например, в синтезе фитоалексинов, каллозы, лигнина, полифенольных веществ, блокирующих распространение фитопатогена в растении [25]. Заметим при этом, что повышение среднесуточной температуры в последние десятилетия обусловлено в том числе более быстрым повышением ночной, а не дневной температуры воздуха.

Процесс патогенеза не только облигатных паразитов растений, но и синтез некротрофным патогеном ферментов и токсинов требует узкого диапазона температур для реализации ожидаемо-

го взаимодействия между элиситорами патогена и рецепторами растения [26–28].

Большая часть работ по оценке полевой устойчивости растений и эпифитотиям посвящена грибным патогенам и лишь незначительная – исследованиям воздействия вирусов, бактерий и нематод [29]. Однако вирусы и их переносчики [30, 31], бактерии [32, 33] и нематоды [34] особенно чувствительны к изменениям температуры.

По результатам моделирования повышенный риск заражения пирикулярриозом риса сохраняется в прохладных, субтропических рисосеящих регионах, например, в Японии, в то время как во влажных тропиках, в частности, на Филиппинах, развитие болезни тормозится из-за повышенных температур [35]. Таким образом, реакция патосистем в конечном итоге определяется как климатическими условиями, так и географическим регионом.

В условиях Люксембурга, согласно модельным исследованиям 6-ти патосистем [36], удлинение стебля в результате потепления климата у рапса масличного может начинаться раньше на 3-е сут.

Потепление климата в Германии, начиная с конца 80-х годов XX столетия, привело к более раннему началу вегетации в естественных растительных сообществах, зацветанию плодовых культур и началу удлинения стебля полевых культур [37].

Концентрация CO₂ и O₃. У растений при повышенных концентрациях CO₂ увеличивается интенсивность фотосинтеза и эффективность использования воды и питательных веществ [4, 38]. В этих условиях у растений изменяется морфология корней, усиливается их ветвление и экссудация химических веществ в ризосферу [39]. Повышение содержания CO₂ в атмосфере ведет к снижению устьичной апертуры и изменениям метаболизма листьев, что снижает вероятность заражения патогенами, проникающими через устьица [40]. Например, повышение концентрации CO₂ повышало устойчивость ячменя к настоящей мучнистой росе [41].

Наряду с данными о положительном действии высоких концентраций CO₂ на устойчивость растений к патогенам, имеются также сведения о негативном эффекте этого фактора [42]. Изменения анатомо-морфологических характеристик растения-хозяина, его функциональной активности и водного баланса могут оказывать существенное влияние на устойчивость к патогенам.

Заслуживает внимание повышение отношения C : N в листьях риса за счет снижения концентрации азотистых соединений и соответ-

ственно снижения питательной ценности листьев для листогрызущих вредителей при повышении концентрации CO_2 . Многие вредители могут выступать в качестве переносчиков болезней.

В условиях повышенной концентрации CO_2 растения риса были более восприимчивы к головне, а возбудители мучнистой росы ячменя и антракноза, вызываемого *Colletotrichum gloeosporoides*, размножались быстрее [43]. Полагают, что дальнейшее повышение концентрации атмосферного CO_2 приведет к усилению пораженности картофеля фитофторозом в Финляндии [44].

Образующийся в тропосфере озон (O_3) считается одним из главных поллютантов, оказывающим отрицательное действие на рост растений и их продуктивность [45]. Его концентрация растет ежегодно на 0.5–2.5% в индустриальных странах. В некоторых областях в мире может встречаться острое воздействие озона в течение вегетационного периода, т.е. высокая концентрация O_3 за короткий промежуток времени. Фактор высокого содержания CO_2 – один или в сочетании с высокой концентрацией O_3 – способствовал увеличению пораженности растений септориозной пятнистостью.

Активные формы кислорода считаются важными компонентами сигнальной системы растений, в том числе на заражение патогенами. Воздействие O_3 приводит к продуцированию активных форм кислорода, таких как пероксид водорода (H_2O_2), активации пероксидазы и NADPH-оксидаз. Это приводит к гибели клеток и визуальному проявлению поражений на восприимчивых видах растений. Также при этом индуцируется каскад изменений метаболизма, часто без повреждений ткани [46]. Некоторые из этих изменений происходят очень быстро, в течение нескольких минут после воздействия [47].

Было установлено, что воздействие повышенного содержания O_3 снижало уровень поражения биотрофных фитопатогенных грибов, например, возбудителя ржавчины *Puccinia sorghi* и бурой пятнистости *Physoderma maydis*, а также мучнистой росы ячменя (*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*) [48]. Вместе с тем в аналогичных условиях усиливалось развитие некротрофных фитопатогенных грибов, таких как *Septoria nodorum*, *Septoria tritici*, *Bipolaris sorokiniana* на ячмене и пшенице [49].

Водный режим. Достаточная обеспеченность водой в сочетании с повышенной температурой ведет к повышению относительной влажности воздуха. Соответственно патогены, требующие для своего развития высокой влажности, получа-

ют благоприятные условия для быстрого распространения [40]. С ростом температуры при достаточном уровне водообеспеченности почвы растет и интенсивность транспирации, благоприятствуя развитию таких заболеваний как фитофтороз картофеля и парша яблони.

Засуха способствует развитию мучнистой росы [50]. Повышение относительной влажности воздуха – развитию фитофтороза пасленовых в диапазоне температур 7.2–26.8°C [51]. Аналогично листовые и некоторые почвенные патогены сильнее развиваются при высокой влажности [52]. Распространение некоторых фитопатогенных грибов имеет серьезные экономические последствия при изменении климата на засушливый. Например, засуха способствовала сильному развитию корневой гнили и мучнистой росы на бобовых [53]. Также отмечено, что при засухе наблюдалось более сильное поражение растений грибами рода *Alternaria*. Показано, что некоторые изоляты *Alternaria* sp. становились вирулентными лишь при засушливых условиях [54]. При засухе наблюдали также усиление поражения растений вирусами [55].

Агротехника. Агротехнические мероприятия (севооборот, обработка почвы как нулевая, так и минимальная, внесение удобрений, известкование, орошение, сроки посева/посадки и др.) играют важную роль в защите посевов от болезней, и они более значимы в краткосрочной перспективе, чем медленно меняющиеся климатические параметры. Однако использование высоких доз удобрений и пестицидов, видовая однотипность, генетическая однородность и загущение посевов, орошение и др. обычно снижают устойчивость агроэкосистем к действию абиотических и биотических стрессоров. Широкое применение пестицидов нарушает экологическое равновесие в агроэкосистемах (эффект “пестицидного бумеранга”) и в большинстве случаев приводит к появлению более агрессивных и вирулентных рас патогенов, а также усилению вредоносности отдельных видов насекомых и сорных растений. Все это на фоне узкой специализации хозяйств и коротких севооборотов сопровождается уничтожением механизмов и структур биоценотической саморегуляции агроэкосистем. В результате оказывается крайне затруднительным поддержание в них экологического равновесия на основе управления динамикой численности и изменчивостью структуры популяций полезных и вредных видов фауны и флоры [56].

В моделях прогнозируется также в связи с ожидаемым снижением урожайности увеличение кратности обработок фунгицидами против миль-

дью винограда на севере Италии в ближайшие десятилетия из-за потепления климата [57], что противоречит принятым в 2020 г. Еврокомиссией решениям снизить к 2030 г. на 50% использование пестицидов под сельскохозяйственные культуры.

Изменение климата обуславливает возможность более раннего посева многих культур (до 2-х нед и более), изменяет время наступления стадий развития и увеличивает скорость развития патогена, нарушая таким образом синхронизацию фенологических фаз развития растения-хозяина и жизненного цикла патогена. Повышенные концентрации CO_2 и O_3 ускоряли старение листьев, увеличивали удельную массу растения в посевах (кг сухой массы/ m^2 посева) и индуцировали изменения в соотношении органов растений и анатомии листьев [58]. На растениях арабидопсиса обнаружена большая плотность устьиц на устойчивых к мучнистой росе сортах, чем на неустойчивых, и устойчивые сорта становились восприимчивыми к мучнистой росе при повышении концентрации этих газов [59].

Следует иметь в виду, что изменение климата и связанное с ним воздействие на растения и фитопатогены являются динамическими процессами. Вполне возможно, что в важных продовольственных регионах урожайность некоторых культур, таких как кукуруза и соя, в будущем снизится из-за глобального потепления и изменения структуры осадков [60], хотя повышенное содержание CO_2 в атмосфере может в некоторой степени смягчить прогнозируемое снижение урожайности. Увеличение потерь урожая из-за болезней, насекомых-вредителей и сорных растений может ухудшить ситуацию (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2019 г.). Возможно, это одна из причин, почему зависимость развития патогенов растений от изменений климата была изучена подробно во всех регионах мира.

Например, большинство имитационных исследований риска болезней различных сельскохозяйственных культур в Бразилии предполагает, что новые температурные условия в конце 21 века могут уменьшить зону высокой вредоносности болезней сельскохозяйственных культур, как это было резюмировано в обзорной статье [61].

ПРЯМОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФИТОПАТОГЕНЫ

Наши знания о физиологии взаимодействия растений и фитопатогенов, популяционной генетике патогенов, а также о сельскохозяйственных

культурах дают представление о том, как изменение климата может повлиять на частоту и тяжесть заболеваний. Не учитывая все эти факторы вместе взятые, трудно строить предположения о последствиях изменения климата, особенно когда отсутствуют долгосрочные наблюдения для разработки и верификации моделей, прогнозирующих будущее.

Во-первых, некоторые особенности изменения климата будут влиять на фенологию заболеваний. Более высокие температуры и/или повышенный уровень CO_2 ускоряют жизненный цикл некоторых патогенных грибов, тем самым увеличивая распространение инокулюма, обеспечивая частое инфицирование растений и ускоренное развитие патологического процесса [62]. Оценка экологических последствий изменения климата требует понимания эффектов взаимодействия множества биотических и абиотических факторов [63]. Действительно, наряду с повышением температуры и концентраций CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4 и других веществ в атмосфере на урожайность культур в посевах влияют влагообеспеченность, агрофон, здоровье почвы, засоренность посевов и т.д. Важное место в конечном эффекте на культуру занимает эволюция патогенов и их хозяев, а также взаимодействие патосистем поля и окружающей полуестественной экосистемы [64]. Только учет комплекса указанных выше факторов может позволить дать корректный прогноз влияний изменений климата на потери урожая полевых культур от возбудителей болезней, с одной стороны, и воздействия болезней на поглощение углекислоты агрофитоценозами и соответственно снижение ее концентрации в воздухе, с другой [65]. Таким образом, болезни растений можно использовать как индикатор изменения климата [66], хотя могут быть также другие более легко определяемые показатели. При этом важны длительные наблюдения, позволяющие выявить корреляции между факторами изменения климата и динамикой развития болезни. Например, анализ архивных материалов Ротамстедской опытной станции по длительному выращиванию пшеницы с 1850 г. на разном агрофоне показал хорошую корреляцию концентрации SO_2 в атмосфере с соотношением поражения двумя патогенами *Phaeosphaeria nodorum* и *Mycosphaerella graminicola* [67].

Эпифитотии зависят от сложных взаимодействий между многими факторами. В целом развитие агрессивного штамма фитопатогена в пределах разнообразной популяции, наличие растений-хозяев, не обладающих устойчивостью к этому вновь появившемуся агрессивному штамму, архитектура растений, единая система агро-

техники и защиты, погодные условия и ограниченная антагонистическая активность ризосферных и эпифитных популяций играют важную и взаимосвязанную роль [68, 69]. Вид патогенеза также имеет немаловажное значение. Например, рост на растениях биотрофных грибов, использующих только живые клетки растения-хозяина, подавляется фунгицидами легче, чем рост некротрофов, которые используют как продукты живых клеток, так и мертвые растительные субстраты [70]. Изменения климата скорее стимулируют развитие грибов-продуцентов микотоксинов, нежели подавляют их [71].

Увеличение концентрации CO₂ и температуры при выращивании перца чили стимулировало поражение двумя бактериальными болезнями (бактериальной гнилью и бактериальной пятнистостью), снижало – антракнозом и влияло несущественно – фитофторозом [72]. Следовательно, новые методы защиты сельскохозяйственных культур должны быть более своевременными и эффективными, чтобы предотвратить вторичную инфекцию.

Фитопатогенные грибы. Наиболее очевидное последствие роста температуры – увеличение продолжительности активного жизненного цикла фитопатогенных грибов. Большое число генераций патогенов на растениях сможет заражать растения на более ранних стадиях развития культур. С потеплением климата и перемещением растения-хозяина на север вслед за ним перемещаются и возбудители патогена. Растения естественных сообществ в итоге могут заражаться в результате миграции часто более агрессивными, чем местные, штаммами возбудителей болезней, занявшими новый ареал полевых культур. Наряду с температурой есть также примеры существенных сдвигов в распространении и развитии грибных патогенов, связанных с изменением и других параметров климата (содержания углекислого газа, влажности) [73–77]. В 5-летнем полевом эксперименте показано, что распространенность и развитие возбудителей пятнистости листьев рода *Cercospora* на багряннике канадском (*Cercis canadensis*) и амбровом дереве (*Liquidambar styraciflua*) были существенно выше в годы с обильными осадками, поскольку влажная погода усиливала распространение конидий грибов [76]. В годы с температурами выше средней заболеваемость древесных пород значительно снижалась, по-видимому, из-за неоптимальной температуры для возбудителя.

С изменениями климата, очевидно, связано усиление частоты встречаемости и вредоносности в условиях Азербайджанской Республики се-

рой гнили винограда (*Botrytis cinerea*) и белой пятнистости на грецком орехе (*Microstroma juglandis*). Значительную роль в этом явлении играет увеличение разности между дневными и ночными температурами (Г.Г. Гусейнов, К.Г. Гусейнов, не опубликовано).

Исследования, в которых имитируется повышенное содержание CO₂, позволяют реалистично оценивать ход болезней, поскольку растения подвергаются воздействию естественных патогенов на фоне одновременного изменения температуры и осадков [76].

Когда генетическая изменчивость культуры невелика, новый штамм патогена может стать доминирующим, что приведет к драматическим последствиям. Новый биотип желтой ржавчины (*Puccinia striiformis*) смог распространиться на 3 новых континента (от Африки до Индии) в течение 3-х лет – быстрее, чем ранее любой патоген сельскохозяйственных культур, и приспособился продуцировать больше спор при температурах выше прежнего оптимума для этого патогена [78, 79]. Изоляты нового штамма производили в день в 3–4 раза больше спор, чем штаммы, характерные для тех же регионов ранее [79]. Быстрое распространение нового штамма, вероятно, является кумулятивным результатом повышенной выживаемости микроорганизма, потепления климата, увеличения рассеивания спор в атмосфере на большие площади. Аналогичные события следует ожидать и в отношении других патогенов, что требует скоординированного международного фитопатологического надзора и действий по обеспечению эффективной борьбы с болезнями сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата.

Модель для предсказания изменений климата и их влияния на инфицирование масличного рапса возбудителем фомоза (возб. *Leptosphaeria maculans*, анаморфа *Phoma lingam*) в условиях Великобритании до 2020 и 2050 гг. показала усиление поражаемости культуры и значительное перемещение возбудителя в северном направлении [80].

Фомоз рапса вызовет снижение урожая в Англии на 10–50% в зависимости от степени будущих изменений климатических условий [81]. При этом в Шотландии, согласно моделям, изменения климата в среднесрочной перспективе могут оказать незначительное влияние на проявление этой болезни [67]. Количественная устойчивость к фомозу у масличного рапса резко снижалась при повышении температуры с 20 до 25°C [82], что сопровождалось увеличением площади зараженных листьев с 5 до 50%. На севере Германии

потепление климата может усилить поражение рапса альтернариозом, склеротиниозом и вертициллезом [83].

Однако обобщение этих результатов в глобальном масштабе пока преждевременно, поскольку конечный эффект климатических изменений на возбудителя болезни будет в значительной мере определяться эффективностью использования устойчивых к патогену сортов [84], а также широко практикуемых в интенсивном растениеводстве, в частности, в Краснодарском крае, многолинейных сортов и сортосмесей.

Фузариозный ожог (*Fusarium* spp.) заражает пшеницу во время цветения, продолжающегося от 11 до 15 сут. При увеличении средней температуры и влажности, особенно в загущенных посевах, возрастает вероятность заражения и наносимый патогеном ущерб урожаю как прямой (снижение урожайности), так и косвенный (накопление в зерне микотоксинов до и после уборки зерна) [85].

Из-за повышения средней температуры регулярные эпифитотии церкоспороза сахарной свеклы (возбудитель *Cercospora beticola*) при сохранении текущего режима увлажнения прогнозируются в 2021–2050 гг. на 5.2 сут ранее средней текущей даты, и на 22.9 сут – в 2071–2100 гг. [86].

Рост средней зимней температуры может вызвать изменение условий перезимовки возбудителя парши яблони *Venturia inaequalis*. При континентальном климате основным источником инокулюма летом служат перезимовавшие в опавшей листве аскоспоры, в то время как при мягких зимах источником заражения становятся перезимовавшие конидии и мицелий из зараженных почек [87].

Известны несколько примеров адаптации всей популяции грибных патогенов к изменению климата. Например, виды рода *Fusarium* и *Microdochium* spp. в Европе постепенно замещаются *Fusarium pseudograminearum* с более высокой оптимальной температурой развития и токсигенностью [88], что приводит к увеличению риска заражения зерна микотоксинами [89]. Аналогичный сдвиг происходит в Канаде, где существующая популяция *Fusarium graminearum* вытесняется высокотоксигенными формами [90]. Есть данные генетических исследований, что некоторые виды ясени в Дании устойчивы против грибного патогена *Chalara fraxinea*, вызывающего гибель деревьев по всей Европе [91, 92]. Для этой патосистемы обнаружена генетическая вариабельность патогена на равнине и гористой местности. Это, несомненно, необходимо принимать во внимание при разра-

ботке моделей для прогноза влияния изменений климата на здоровье растений в соответствующих регионах, что пока даже в пределах одной страны не делается.

Оомицеты. Фитофтороз картофеля является наиболее вредоносным заболеванием картофеля. Отмечено, что рост экономических потерь от этой болезни происходит уже 30 лет по всему миру [93]. Это может быть вызвано распространением новых популяций, сочетающих типы спаривания A1 и A2, что позволяет образовать ооспоры после полового процесса и адаптироваться к новым климатическим условиям и новым устойчивым сортам картофеля и томата. Проведенный в 2009–2017 гг. мониторинг популяций возбудителя фитофтороза, в основном из Московской обл. РФ, показал, что средние частоты присутствия типов спаривания A1 и A2 в картофельной субпопуляции составляли 40.5 и 59.5% соответственно. До 2008 г. в России доминировали изоляты A1-типа и соответственно адаптация патогена к новым условиям, устойчивым сортам и фунгицидам проходила медленнее [94].

Оценка влияния изменения климата, проведенная в многолетних экспериментах, показала, что при росте средней температуры на 1°C период применения фунгицидов для защиты картофеля от фитофтороза удлиняется на 10–20 сут в зависимости от количества осадков, а в случае несостоявшейся защиты (например, из-за резистентности патогена), потери возрастут на 2 т/га на каждый градус потепления [95].

Еще одним примером усиления эпифитотий является оомицет *Phytophthora cinnamomi*, поражающий более 1 тыс. видов растений как в умеренных, так и субтропических регионах земного шара [73]. В условиях изменения климата этот патоген является важным фактором уязвимости лесных экосистем Центральной Европы [96]. Повышение температуры будет способствовать расширению ареала *Ph. cinnamomi* от западного побережья Европы на нескольких сотен километров на восток в течение одного столетия [97]. Сходным образом *Phytophthora ramorum* – патоген, не известный в Европе до конца 1990-х гг., быстро стал главной угрозой для целого ряда видов растений в лесах Западной Европы. Более 20 различных видов широколиственных деревьев заражены в Южной Англии [98], а с осени 2009 г. были отмечены эпифитотии на ранее не поражавшихся видах хозяев [99, 100]. Благодаря ввозу в Европу новых видов декоративных растений и изменению климата этот патоген не только смог пересечь океан, но и окончательно распространился в большинстве европейских стран.

Напротив, сценарии, основанные на модели CLIMEX (<http://climatemodel.net/climex.htm>, описывают реакцию вида на климатические изменения), предполагают, что область, благоприятная для *Ph. ramorum*, заметно уменьшится в восточной части США, но увеличится на западном побережье Северной Америки [101, 102].

Изучали влияние увеличения атмосферной концентрации CO₂ и O₃ на поражаемость сои пероноспорозом, септориозом и синдромом неожиданной гибели. Повышенная концентрация CO₂ в сочетании с O₃ снижали поражаемость пероноспорозом, увеличивали поражаемость септориозом и не оказывали влияния на синдром неожиданной гибели сои [58].

В дискуссиях о влиянии изменений климата (погоды) на здоровье растений остается вне широкого обсуждения искомое воздействие на здоровье почвы с позиций как среды обитания растительных патогенов, так и роли почвенной микробиоты в обеспечении здоровья растений и продуктивности агрофитоценозов [103, 104]. Пока есть лишь консенсус, что влияние изменений погоды на болезни растений наземной сферы изучено гораздо глубже, чем на почвенные патогены растений [75]. Прогресс в понимании того, как обе группы патогенов растений реагируют на изменение климата, может быть достигнут с использованием появляющихся новых генетических технологий [105, 106].

Фитопатогенные бактерии. В условиях изменения климата и расширения международной торговли сельскохозяйственными продуктами ожидается, что фитопатогенные бактерии станут более вредоносными для сельскохозяйственных культур [68]. Внешне здоровые, но латентно зараженные древесные растения, рассада декоративных культур и семена [107, 108] служат идеальным способом распространения бактерий на большие расстояния через глобальную торговлю посадочным и посевным материалом. Высокая концентрация производства коммерческих семян, 60% мирового рынка которых находятся под контролем 4-х крупных компаний [109], ведет к опасной концентрации семеноводства в странах третьего мира, где преобладает субтропический климат, что повышает вероятность перманентной латентной зараженности сельскохозяйственной продукции растительного происхождения опасными фитопатогенами, характерными для этой климатической зоны.

Несколько видов бактерий, включая *Ralstonia* spp., *Acidovorax* spp., *Burkholderia* spp., *Xylella fastidiosa*, *Phytoplasma* spp., *Liberibacter* spp., стали суще-

ственной проблемой для мирового сельского хозяйства в последние годы. Общим признаком этих бактерий является высокая оптимальная температура для роста: 32–36°C, в то время как другие бактерии предпочитают меньшую температуру 27–30°C [110]. Известно немало примеров подобного распространения новых фитопатогенов из субтропиков в страны умеренной климатической зоны. Новые штаммы фитопатогенных бактерий импортируются вместе с сельскохозяйственной продукцией в страны умеренного климата и легко там адаптируются. Показательный пример – черная ножка и мокрая гниль картофеля, которые вызывались *Pectobacterium* spp. Однако, начиная с 2000 г., бактерии нового рода *Dickeya* spp., ранее известные в основном в субтропическом регионе, стали доминирующим возбудителем этих болезней в Европе [111].

Ожог листьев конского каштана, вызываемый *Pseudomonas syringae*, представляет собой еще один пример. В 1980-х гг. этот патоген вызывал заболевания местного вида конского каштана в Индии [112], однако в 2002 г. агрессивная популяция *P. syringae* была обнаружена на европейском конском каштане в Нидерландах и быстро распространилась во многих западноевропейских странах [108]. Аналогично новая группа штаммов *P. syringae* поставила под угрозу всю индустрию киви в мировом масштабе [113].

Повышение температуры приводит к усилению агрессивности фитопатогенных бактерий и повышению частоты заражения. Оптимальная температура для размножения бактерий находится в диапазоне от 28 до 36°C, и повышение минимальной температуры в поле с 16°C до 20°C приводит к двукратному росту частоты инфицирования растений семейства Капустные возбудителем сосудистого бактериоза капусты *Xanthomonas campestris*, а вероятность развития болезни повышается на 40% [20]. Аналогичная тенденция отмечена для возбудителя ожога и пятнистости злаков *Acidovorax avenae* – площадь поражения на пшенице возросла в 6 раз при росте минимальной температуры с 18 до 26°C [114].

Эксперименты в контролируемых условиях показали, что температура в диапазоне 25–30°C и повышение концентрации CO₂ от 400 до 700 ppm намного сильнее влияли на развитие бактериальных заболеваний (*Ralstonia solanacearum* и *Xanthomonas vesicatoria*) на перце чили (*Capsicum annuum*), чем на фитофтороз, вызванный *Ph. capsici* и на антракноз, вызванный *Colletotrichum acutatum* [72].

Необходимо учитывать, что изменение климата может усилить угрозу со стороны фитопатоген-

ных бактерий, переходящих к паразитизму на животных и человеке. Известно, что патогенные для животных грамотрицательные бактерии могут заражать растения в качестве альтернативных хозяев [115]. Возбудитель внутрибольничных инфекций *Pseudomonas aeruginosa* вызывает поражение растений [16]. Сальмонелла (*S. typhimurium*) колонизирует томат [117], салат-латук [118]. Кишечная палочка (*E. coli*) может колонизировать листья и корни салата и шпината [119]. Поскольку гены вирулентности могут передаваться между бактериями различных видов [120], такие события представляют реальную угрозу для здоровья человека и животных, а не только растений. По аналогии с зоонозом (бактериями, передаваемыми от животного к человеку), этот класс фитопатогенных бактерий называют “фитонозом” [121]. Одной из наиболее серьезных угроз со стороны фитопатогенных бактерий являются приобретенные гены устойчивости к антибиотикам, присутствующие в бактериальном сообществе [122].

Фитопатогенные вирусы. Влияние вирусных заболеваний на урожайность растения и качество продукции вполне очевидно. Большинство вирусов имеет достаточно узкий диапазон оптимальной температуры для системного распространения в растении, нижний порог которого составляет примерно 15°C. Таким образом, потепление климата приводит к расширению периода активного заражения и накопления вирусной инфекции в растениях [123, 124]. Особую опасность представляет заражение растений 2-мя и более вирусами одновременно, которое резко повышает вредоносность заболевания [125–127].

Рост температуры влияет также на размножение, распространение и активность переносчиков вирусов — насекомых, нематод, клещей, фитопатогенных грибов и оомицетов [128–130]. Аналогично тому, как смешанное заражение влияет на развитие вирусов в растении, оно видоизменяет отношения между вирусами и переносчиком, позволяя патогену дольше сохраняться в популяции вектора и активнее заражать растения [131, 132].

Важным фактором распространения вирусов является увеличение популяции переносчика, например, видов крылатой тли (Hemiptera: Aphididae) [133]. Кроме того, рост средних температур и в особенности продолжительности периода, когда минимальные температуры превышают 16°C, обеспечивает системное заражение вирусами всего растения.

В многолетнем полевом эксперименте на кукурузе (*Zea mays*) в тропических климатических

условиях показано, что число переносчиков (цикадки *Cicadulina mbila* и *Peregrinus maidis*) и частота вирусных заболеваний были тесно связаны с периодами с температурой >24°C, в то время как влияние осадков и относительной влажности воздуха оказались менее значимыми [134].

Оценка динамики ареалов, занимаемых беспозвоночными видами — потенциальными переносчиками болезней растений за 25-летний период показала, что 83.6% из 275 видов продвинулись на север. При повышении средних температур, особенно в зимний период, 5 из 8 видов изученных насекомых увеличили численность популяций [135]. Рост числа потенциальных переносчиков ведет, в частности, к ускорению переноса вирусов картофеля в течение вегетационного периода.

Таким образом, изменение климата способно кардинальным образом расширить распространенность и вредоносность вирусных болезней растений в странах умеренной климатической зоны, включая РФ.

Новые виды переносчиков фитопатогенов часто распространяются в новых экологических условиях, где большинство их естественных врагов отсутствуют. Примером может служить внедрение *B*-биотипа табачной (хлопковой) белокрылки (*B. tabaci*) в Бразилии. Этот биотип переносит около 100 видов вирусов, присутствующих в местных растениях, на культивируемые культуры томата, что привело к новым эпифитотиям вирусных заболеваний этой культуры по всему миру [136].

Взаимодействие между видами растений не рассматривается в большинстве экспериментов, хотя конечный результат реакции вида на изменение условий окружающей среды может зависеть от таких экосистемных процессов, как конкуренция, мутуализм и симбиоз [137]. Например, сорняки являются компонентами управляемых экосистем, и биотические взаимоотношения между составляющими их видами имеют важное значение [4, 138].

ФИТОПАТОГЕНЫ В ТАЮЩИХ ЛЕДНИКАХ И ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ, ПОЯВЛЕНИЕ НОВЫХ МАРШРУТОВ ПЕРЕНОСА ПАТОГЕНОВ ВОЗДУШНЫМИ МАССАМИ

Вирус мозаики томата (род *Tobamovirus*) — один из наиболее устойчивых к воздействию факторов окружающей среды, часто выделяется из образцов почвы, воды, облаков. Этот вирус был обнаружен ПЦР-анализом в образцах льда возрастом от 500 до 140000 лет в ледниках Гренландии.

дии. Последовательности амплифицированных нуклеиновых кислот отличались высоким разнообразием, что показывает риск скорого появления новых патотипов этого вируса. Кроме того, этот факт показывает возможность присутствия в арктических и антарктических льдах других фитопатогенных вирусов, представляющих потенциальную угрозу современному сельскому хозяйству [139]. В ледниках и вечной мерзлоте, занимающей 2% поверхности Земли, сохранилось большое количество фитопатогенных бактерий [140]. Популяции грибов в образцах льда вечной мерзлоты были выделены из проб любого возраста. Более 80 видов были найдены микологическими методами и ПЦР-анализом, включая фитопатогенные штаммы [141]. В целом расширение хозяйственной деятельности на Крайнем Севере ведет к расширению ареала фитопатогенов, поражающих сельскохозяйственные культуры в зимний период [142].

Огромную роль в распространении фитопатогенных бактерий рода *Pseudomonas* играют естественные элементы кругооборота воды, включая дождь, снег, природные водные потоки и пресные водоемы. *P. syringae* играет важную роль в конденсации воды в атмосфере и кристаллизации льда за счет синтеза белка конденсации льда (ice nucleation protein) [143, 144].

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Современные технологии защиты растений, возможно, нуждаются в пересмотре из-за изменения климата. Интегрированная защита растений объединяет агротехнические, биологические и химические меры контроля для сокращения численности вредных организмов ниже порогового уровня. Поскольку многие фитопатогены развиваются быстрее в ответ на повышение температуры [145], потери урожая могут произойти при меньших пороговых показателях повреждений, чем те, при которых ранее начинали проведение защитных мероприятий. По мере повышения температуры частота весенних заморозков будет снижаться, а возникающие в результате этого длительные безморозные периоды будут увеличивать продолжительность периодов размножения насекомых-переносчиков фитопатогенов, осваивающих новые северные территории часто за счет заноса сильными воздушными потоками.

Косвенные последствия изменения климата могут также возникать из-за сдвигов в структуре посевов и распределении сельскохозяйственных культур. Принимая во внимание неопределен-

ность последствий изменения климата в различных регионах мира [146], разработка новых стратегий защиты сельскохозяйственных культур уже в ближайшем будущем станет реальной задачей.

Кроме изменения климата важную роль играет и размещение культур в севооборотах. Анализ данных 235 полевых опытов на картофеле в Финляндии за период с 1992 по 2002 г. показал, что фитофтороз начинался на 9 сут раньше в том случае, если предшествующей культурой был картофель [147].

Защита сельскохозяйственных культур сама по себе играет важную роль в смягчении последствий изменения климата. Биологические методы защиты сельскохозяйственных культур могут сократить концентрацию парниковых газов в атмосфере. В Великобритании на долю пашни приходится более 7% от общего объема выбросов углекислого газа за счет дыхательной активности почвы [148].

Эффективность и длительность последующего действия пестицидов определяется в том числе и факторами окружающей среды, которые могут оказать на них как положительное, так и отрицательное влияние. Анализ зависимости затрат на применение средств защиты растений от температуры воздуха и количества осадков в США показал, что увеличение последнего повышало искомые затраты при выращивании кукурузы, хлопчатника, картофеля, сои, пшеницы, а потепление – повышало у тех же культур, за исключением пшеницы, у которой затраты снижались [149]. Увеличение числа и вредоносности сорных растений, вредителей и болезней на культуры в агрофитоценозе по мере потепления климата может потребовать увеличения частоты обработок средствами защиты растений [5, 102, 150], а в последующем – их норм и концентраций. Все это в конечном итоге может привести к возникновению резистентности патогенов, повышению себестоимости производства продукции и необходимости синтеза новых средств защиты растений. Как показывают результаты моделирования, с потеплением климата скорость распада отдельных гербицидов, в частности, изопротурона, в почве возрастает [151]. С одной стороны, это может затруднить борьбу с сорными растениями в посевах озимой пшеницы осенью, при этом снижая в определенной мере химическую нагрузку на окружающую среду. С другой стороны, при снижении количества осадков и почвенной засухе фитотоксичность гербицидов, особенно для последующих чувствительных культур, может сохраниться. Необходимо также иметь в виду, что многие виды сорных растений могут служить в

качестве хозяина для целого ряда болезней и вредителей.

Изменения климата оказывают существенное влияние на эффективность фунгицидов, которая зависит, в частности, от количества и времени выпадения осадков. Температура влияет на скорость деградации фунгицидов, изменяет морфологию и скорость метаболизма растений, оказывает воздействие на проникновение, транспорт и характер воздействия фунгицидов [152]. В условиях повышенного содержания CO₂ увеличение толщины эпикуткулярного воскового слоя листьев, снижение плотности устьиц и их апертуры может привести к уменьшению поглощения фунгицидов растениями и их эффективности [153, 154].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный обзор свидетельствует о том, что за последнее десятилетие опубликовано множество работ, посвященных анализу влияния факторов глобального изменения климата на развитие и вредоносность фитопатогенных микроорганизмов. Несмотря на то, что это влияние может носить разнонаправленный характер, в большинстве случаев вектор этих изменений направлен на усиление вредоносности болезней растений. Эти изменения обусловлены как непосредственным влиянием факторов климата на фитопатогены, так и опосредованным воздействием через изменения метаболизма растений-хозяев (как культурных, так и сорных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- United Nations. General Assembly. Resolution adopted by the General Assembly on 20 December 2018, 73/252. International Year of Plant Health. Available at: https://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/73/252.
- A year to celebrate plants: UN proclaims 2020 the International Year of Plant Health. Available at: <https://www.ipcc.int/en/news/a-year-to-celebrate-plants-un-proclaims-2020-the-international-year-of-plant-health/>
- Завриев С., Игнатов А. Потенциальные угрозы в сфере сельскохозяйственной и продовольственной безопасности // Мир. эконом. и международ. отношения. 2020. Т. 64. № 7. С. 98–105.
- Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г. Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам // Агрохимия. 2019. № 12. С. 83–96.
- Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г., Гусейнов К.Г., Джалилов Ф.С.-У. Реакция сорного компонента агрофитоценоза на изменение климата // Агрохимия. 2020. № 11. С. 90–104.
- Глобальное потепление на 1.5°C: Специальный доклад МГЭИК о последствиях глобального потепления на 1.5°C выше доиндустриальных уровней и о соответствующих траекториях глобальных выбросов парниковых газов в контексте укрепления глобального реагирования на угрозу изменения климата, а также устойчивого развития и усилий по искоренению нищеты / Под ред. Массон-Дельмотт В., Чжай П., Пертнер Г.О., Робертс Д., Ски Д., Шукла П.П., Пирани А., Муфума-Окия В., Пеан К., Пидкок Р., Коннорс С., Мэтьюз Д.Б.Р., Чжень Я., Чжоу С., Гомис М.И., Лонной Е., Мейкок Т., Тигнор М., Уотерфилд Т. Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2019. 94 с.
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Alexander L.V., Allen S.K., Bindoff N.L., Bréon F.-M., Church J.A., Cubasch U., Emori S., Forster P., Friedlingstein P., Gillett N., Gregory J.M., Hartmann D.L., Jansen E., Kirtman B., Knutti R., Krishna Kumar K., Lemke P., Marotzke J., Masson-Delmotte V., Meehl G.A., Mokhov I.I., Piao S., Ramaswamy V., Randall D., Rhein M., Rojas M., Sabine C., Shindell D., Talley L.D., Vaughan D.G. and Xie S.-P. Technical Summary Supplementary Material // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. P. 33–115. Available from www.climatechange2013.org and www.ipcc.ch
- Nakicenovic N., Davidson O., Davis G., Grübler A., Kram T., Lebre La Rovere E., Metz B., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Sankovski A., Shukla P., Swart R., Watson R., Dadi Zh. Summary for Policymakers. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2000. 27 p. ISBN: 92–9169–113–5.
- Li H., Fan K., Xu Z., Li H. Modified three-dimensional jet indices and their application to East Asia // Atmosphere. 2019. V. 10 (12). P. 776.
- Reeves T., Thomas G., Ramsay G. Save and grow in practice: maize, rice, wheat; a guide to sustainable production FAO, Rome, 2016 // Food Sec. 2016. V. 8. P. 1207–1208.
- Seem R.C., Magarey R.D., Zack J.W., Russo J.M. Estimating disease risk at the whole plant level with general circulation models // Environ. Pollut. 2000. V. 108. P. 389–395.
- Terblanche J.S., Hoffmann A.A., Mitchell K.A., Rako L., Le Roux P.C., Chown S.L. Ecologically relevant measures of tolerance to potentially lethal temperatures // J. Exp. Biol. 2011. V. 214. Iss. 22. P. 3713–3725.
- Davies L., Bell J.N.B., Bone J., Head M., Hill L., Howard C. Open Air Laboratories (OPAL): a community driven research programme // Environ. Pollut. 2011. V. 159. P. 2203–2210.
- Chytrý M., Wild J., Pyšek P., Jarošík V., Dendoncker N., Reginster I. Projecting trends in plant invasions in Europe under different scenarios of future land-use change // Glob. Ecol. Biogeograph. 2012. V. 21. P. 75–87.

15. *Shaw M.W.* Preparing for changes in plant diseases due to climate change // *Plant Protect. Sci.* 2009. V. 45. S. 3–S10.
16. *Hannukkala A.O.* Examples of alien pathogens in Finnish potato production – their introduction, establishment and consequences // *Agricult. Food Sci.* 2011. V. 20. P. 42–61.
17. *Danon L., Ford A.P., House T., Jewell C.P., Keeling M.J., Roberts G.O.* Networks and the epidemiology of infectious disease // *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases.* 2011. Article ID 284909. 28 p.
18. *Cheng C., Gao X., Feng B., Sheen J., Shan L., He P.* Plant immune response to pathogens differs with changing temperatures // *Nature commun.* 2013. V. 26. № 4 (1). P. 1–9.
19. *Cavrak V.V., Lettner N., Jamge S., Kosarewicz A., Bayer L.M., Scheid O.M.* How a retrotransposon exploits the plant's heat stress response for its activation // *PLoS genetics.* 2014. V. 10 (1). e1004115.
20. *Игнатов А.Н.* Генетическое разнообразие фитопатогенных бактерий *Xanthomonas campestris* и устойчивость к ним растений семейства Brassicaceae: дис. ... д-ра биол. наук. М., 2006. С. 80–87.
21. *Zhu Y., Qian W., Hua J.* Temperature modulates plant defense responses through *NB-LRR* proteins // *PLoS pathogens.* 2010. V. 6 (4). e1000844.
22. *Velásquez A.C., Castroverde C.D., He S.Y.* Plant-pathogen warfare under changing climate conditions // *Curr. Biol.* 2018. V. 28 (10). P. 619–634.
23. *Loneragan J.F., Snowball K.* Rate of calcium absorption by plant roots and its relation to growth // *Austral. J. Agricult. Res.* 1969. V. 20 (3). P. 479–490.
24. *Ho L.C., Adams P., Li X.Z., Shen H., Andrews J., Xu Z.H.* Responses of Ca-efficient and Ca-inefficient tomato cultivars to salinity in plant growth, calcium accumulation and blossom-end rot // *J. Horticult. Sci.* 1995. V. 70 (6). P. 909–918.
25. *Pavarini D.P., Pavarini S.P., Niehues M., Lopes N.P.* Exogenous influences on plant secondary metabolite levels // *Animal Feed Sci. Technol.* 2012. V. 176 (1–4). P. 5–16.
26. *Вандерланк Я.* Генетические и молекулярные основы патогенеза у растений М.: Мир, 1981. 236 с.
27. *Nüske J., Fritsche W.* Phaseolotoxin production by *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*: the influence of temperature // *J. Basic Microbiol.* 1989. V. 29 (7). P. 441–447.
28. *Weingart H., Stubner S., Schenk A., Ullrich M.S.* Impact of temperature on in planta expression of genes involved in synthesis of the *Pseudomonas syringae* phytoxin coronatine // *Mol. Plant-microbe Interact.* 2004. V. 17 (10). P. 1095–1102.
29. *Coakley S.M.* Biospheric change: will it matter in plant pathology? // *Canad. J. Plant Pathol.* 1995. V. 17. P. 147–153.
30. *Canto T., Aranda M.A., Fereres A.* Climate change effects on physiology and population processes of hosts and vectors that influence the spread of hemipteran-borne plant viruses // *Global Change Biol.* 2009. V. 15. P. 1884–1894.
31. *Habekuss A., Riedel C., Schliephake E., Ordon F.* Breeding for resistance to insect-transmitted viruses in barley—an emerging challenge due to global warming // *J. Kulturpflanzen.* 2009. V. 61 (2). P. 53–61.
32. *Anderson A.J., Blee K.A., Yang K.-Y.* Commercialization of plant systemic defense activation: theory, problems and successes // *Multigenic and induced systemic resistance in plants* / Eds. Tuzun S., Bent E. Berlin: Springer, 2006. P. 386–414.
33. *Ping L., Boland W.* Signals from the underground: bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis* // *Trends Plant Sci.* 2004. V. 9 (6). P. 263–266.
34. *Neilson R., Boag B.* The predicted impact of possible climatic change on virus-vector nematodes in Great Britain // *Europ. J. Plant Pathol.* 1996. V. 102. P. 193–199.
35. *Luo Y., TeBeest D.O., Teng P.S., Fabellar N.G.* Simulation studies of risk analysis of rice leaf blast epidemics associated with global climate change in several Asian countries // *J. Biogeography.* 1995. V. 22. P. 673–678.
36. *Junk J., Eickermann M., Görden K., Hoffmann L., Beyer M.* Ensemble-based analysis of regional climate change effects on the cabbage stem weevil (*Ceutorhynchus pallidactylus* (Mrsh.)) in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) // *J. Agric. Sci.* 2012. V. 150. P. 191–202.
37. *Chmielewski F.-M., Müller A., Bruns E.* Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000 // *Agricult. Forest Meteorol.* 2004. V. 121. Iss. 1–2. P. 69–78.
38. *Kimball B.A., Zhu J., Cheng L., Kobayashi K., Bindi M.* Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment // *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao.* 2002. V. 13 (10). P. 1323–1338.
39. *Pickles B.J., Egger K.N., Massicotte H.B., Green D.S.* Ectomycorrhizas and climate change // *Fungal Ecol.* 2012. V. 5. P. 73–84.
40. *McElrone A.J., Reid C.D., Hoyer K.A.* Elevated CO₂ reduces disease incidence and severity of a red maple fungal pathogen via changes in host physiology and leaf chemistry // *Global Change Biol.* 2005. V. 11. P. 1828–1836.
41. *Hibberd J.M., Whitbread R., Farrar J.F.* Effect of elevated concentrations of CO₂ on infection of barley by *Erysiphe graminis* // *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 1996. V. 48. P. 37–53.
42. *Manning W.J., Tiedemann A.V.* Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases // *Environ. Pollut.* 1995. V. 88 (2). P. 219–245.
43. *Kobayashi T., Ishiguro K., Nakajima T., Kim H.Y., Okada M., Kobayashi K.* Effects of Elevated Atmospheric CO₂ Concentration on the Infection of Rice Blast and Sheath Blight // *Phytopathology.* 2006. V. 96 (4). P. 425–431.
44. *Carter T.R., Saarikko R.A., Niemi K.J.* Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland // *Agricult. Food Sci. Finland.* 1996. V. 5. P. 329–350.
45. *Wilkinson S., Mills G., Illidge R., Davies W.J.* How is ozone pollution reducing our food supply? // *J. Exp. Bot.* 2012. V. 63 (2). P. 527–536.
46. *Iriti M., Faoro F.* Chemical Diversity and Defence Metabolism: How Plants Cope with Pathogens and Ozone

- Pollution // *Inter. J. Mol. Sci.* 2009. V. 10 (8). P. 3371–3399.
47. *Blomster T., Salojarvi J., Sipari N., Brosche M., Ahlfors R.* Apoplastic reactive oxygen species transiently decrease auxin signaling and cause stress induced morphogenic response in *Arabidopsis* // *Plant Cell Environ.* 2011. V. 33. P. 453–467.
 48. *Mikkelsen B.L., Jørgensen R.B., Lyngkjær M.F.* Complex interplay of future climate levels of CO₂, ozone and temperature on susceptibility to fungal diseases in barley // *Plant Pathol.* 2014. V. 64 (2). Iss. 2. P. 319–327.
 49. *von Tiedemann A., Firsching K.H.* Interactive effects of elevated ozone and carbon dioxide on growth and yield of leaf rust-infected versus non-infected wheat // *Environ. Pollut.* 2000. V. 108 (3). P. 357–363.
 50. *Coakley S.M., Scherm H., Chakraborty S.* Climate change and plant disease management // *Annu Rev. Phytopathol.* 1999. V. 37. P. 399–426.
 51. *Fry W.E., McGrath M.T., Seaman A.* The 2009 Late Blight Pandemic in the Eastern United States – Causes and Results // *Plant Disease.* 2013. V. 97 (3). P. 296–306.
 52. *Lindsey D.T., Woodward J.E.* Diseases of peanut caused by soilborne pathogens in the southwestern United States // *Inter. Scholarly Res. Network, ISRN Agron.* 2012. Article ID 517905. 9 p.
 53. *Gautam H.R., Bhardwaj M.L., Kumar R.* Climate change and its impact on plant diseases // *Curr. Sci.* 2013. V. 105. P. 1685–1691.
 54. *Lonsdale D., Gibbs J.N.* Effects of climate change on fungal diseases of trees // *Fungi and Environmental Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 1019 p.
 55. *Clover G.R.G., Smith H.G., Azam-Ali S.N., Jaggard K.W.* The effects of drought on sugar beet growth in isolation and in combination with Beet yellows virus (BYV) infection // *J. Agricult. Sci.* 1999. V. 133. P. 251–261.
 56. *Жученко А.А.* Экологическая генетика культурных растений и проблемы агросферы (теория и практика): монография. М.: Изд-во Агрорус, 2004. Т. I. 690 с.
 57. *Salinari F., Giosue S., Tubiello F.N., Rettori A., Rossi V., Spanna F.* Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change // *Glob. Change Biol.* 2006. V. 12. P. 1299–1307.
 58. *Elevated atmospheric Eastburn D.M., Degennaro M.M., Delucia E.H., Dermody O., McElrone A.J.* carbon dioxide and ozone alter soybean diseases in SoyFACE // *Glob. Change Biol.* 2010. V. 16. P. 320–330.
 59. *Lake J.A., Wade R.N.* Plant-pathogen interactions and elevated CO₂: morphological changes in favour of pathogens // *J. Exp. Bot.* 2009. V. 60. P. 3123–3131.
 60. *Porter J.R., Challinor A.J., Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J.* Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Cambridge: IPCC, 2014. P. 485–533.
 61. *Juroszek P., von Tiedemann A.* Linking Plant Disease Models to Climate Change Scenarios to Project Future Risks of Crop Diseases: A Review // *J. Plant Dis. Protect. – New Series.* 2015. V. 122 (1). P. 3–15.
 62. *Chakraborty S., Datta S.* How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO₂ under changing climate? // *New Phytologist.* 2003. V. 159 (3). P. 733–742.
 63. *Médiène S., Valantin-Morison M., Sarthou J.-P., de Tourdonnet S., Gosme M., Bertrand M.* Agroecosystem management and biotic interactions: a review // *Agron. Sustain. Develop.* 2011. V. 31. P. 491–514.
 64. *Burdon J.J., Thrall P.H.* Pathogen evolution across the agro-ecological interface: implications for disease management // *Evolut. Appl.* 2008. V. 1. P. 57–65.
 65. *O'Halloran T.L., Law B.E., Goulden M.L., Wang Z., Barr J.G., Schaaf C.* Radiative forcing of natural forest disturbances // *Glob. Change Biol.* 2012. In press. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02577.x>
 66. *Garrett K.A., Nita M., De Wolf E.D., Gomez L., Sparks A.H.* Plant pathogens as indicators of climate change // *Climate change: observed impacts on planet Earth / Ed. Letcher T.* Dordrecht: Elsevier, 2009. P. 425–437.
 67. *Fitt B.D.L., Fraaije B.A., Chandramohan P., Shaw M.W.* Impacts of changing air composition on severity of arable crop disease epidemics // *Plant Pathol.* 2011. V. 60. P. 44–53.
 68. *Jones R.A.C., Barbetti M.J.* Influence of climate change on plant disease infections and epidemics caused by viruses and bacteria // *CAB Rev.* 2012. V. 7. P. 1–33.
 69. *Pangga I.B., Hanan J., Chakraborty S.* Climate change impacts on plant canopy architecture: implications for pest and pathogen management // *Europ. J. Plant Pathol.* 2013. V. 135. P. 595–610.
 70. *Beed F. Benedetti A., Cardinali G., Chakraborty S., Dubois T., Garrett K., Halewood M.* Climate change and micro-organism genetic resources for food and agriculture: state of knowledge, risks and opportunities. Rome: FAO, 2011. (available at <http://www.fao.org/docrep/meeting/022/mb392e.pdf>)
 71. *Medina Villar S., Alonso Á., Vázquez de Aldana B.R., Pérez C.E., Castro-Díez P.* Decomposition and biological colonization of native and exotic leaf litter in a Central Spain stream // *Limnetica.* 2015. V. 34 (2). P. 293–310.
 72. *Shin J.-W., Yun S.-C.* Elevated CO₂ and Temperature Effects on the Incidence of Four Major Chili Pepper Diseases // *Plant Pathol. J.* 2010. V. 26 (2). P. 178–184.
 73. *Sturrock R.N., Frankel S.J., Brown A.V., Hennon P.E., Kliejunas J.T., Lewis K.J., Worrall J.J., Woods A.J.* Climate change and forest diseases // *Plant Pathol.* 2011. V. 60. P. 133–149.
 74. *Percy K.E., Awmarck C.S., Lindroth R.L., Kubiske M.E., Kopper B.J., Isebrands J.G.* Altered performance of forest pests under atmospheres enriched by CO₂ and O₃ // *Nature.* 2002. V. 420. P. 403–407.
 75. *Eastburn D.M., McElrone A.J., Bilgin D.D.* Influence of atmospheric and climatic change on plant-pathogen interactions // *Plant Pathol.* 2011. V. 60. P. 54–69.
 76. *McElrone A.J., Hamilton J.G., Krafnick A.J., Aldea M., Knepp R.G., DeLucia E.H.* Combined effects of elevated CO₂ and natural climatic variation on leaf spot diseases of redbud and sweetgum trees // *Environ. Pollut.* 2010. V. 158. P. 108–114.
 77. *Melloy P., Hollaway G., Luck J.O., Norton R.O.B., Atkinson E., Chakraborty S.* Production and fitness of *Fusar-*

- ium pseudograminearum* inoculum at elevated carbon dioxide in FACE // *Glob. Change Biol.* 2010. V. 16. P. 3363–3373.
78. *Hovmøller M.S., Yahyaoui A.H., Milus E.A., Justesen A.F.* Rapid global spread of two aggressive strains of a wheat rust fungus // *Mol. Ecol.* 2008. V. 17. P. 3818–3826.
 79. *Hovmøller M.S., Sørensen C.K., Walter S., Justesen A.F.* Diversity of *Puccinia striiformis* on cereals and grasses // *Annu. Rev. Phytopathol.* 2011. V. 49. P. 197–217.
 80. *Evans N., Baierl A., Semenov M.A., Gladders P., Fitt B.D.L.* Range and severity of a plant disease increased by global warming // *J. Royal Soc. Interface.* 2008. V. 5. P. 525–531.
 81. *Evans N., Butterworth M.H., Baierl A., Semenov M.A., West J.S., Barnes A.* The impact of climate change on disease constraints on production of oilseed rape // *Food Security.* 2010. V. 2. P. 143–156.
 82. *Huang Y.J., Pirie E.J., Evans N., Delourme R., King G.J., Fitt B.D.L.* Quantitative resistance to symptomless growth of *Leptosphaeria maculans* (Phoma stem canker) in *Brassica napus* (oilseed rape) // *Plant Pathol.* 2009. V. 58. P. 314–323.
 83. *Siebold M., von Tiedemann A.* Potential effects of global warming on oilseed rape pathogens in Northern Germany // *Fungal Ecol.* 2012. V. 5. P. 62–72.
 84. *Skelsey P., Rossing W.A.H., Kessel G.J.T., van der Werf W.* Invasion of *Phytophthora infestans* at the landscape level: how do spatial scale and weather modulate the consequences of spatial heterogeneity in host resistance? // *Phytopathology.* 2010. V. 100. P. 1146–1161.
 85. *Magdwick J.W., West J.S., White R.P., Semenov M.A., Townsend J.A., Turner J.A.* Impacts of climate change on wheat anthesis and fusarium ear blight in the UK // *Europ. J. Plant Pathol.* 2011. V. 130. P. 117–131.
 86. *Richerzhagen D., Racca P., Zeuner T., Kuhn C., Falke K., Kleinhenz B.* Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of *Cercospora* leaf spot in Lower Saxony // *J. Plant Dis. Prot.* 2011. V. 118. P. 168–177.
 87. *Holb I.J., Heijne B., Withagen J.C.M., Gall J.M., Jeger M.J.* Analysis of summer epidemic progress of apple scab at different apple production systems in the Netherlands and Hungary // *Phytopathology.* 2005. V. 95. P. 1001–1020.
 88. *Isebaert S., Saeger D.D., Devreese R., Verhoeven R., Maene P., Heremans B., Haesaert G.* Mycotoxin-producing *Fusarium* species occurring in winter wheat in Belgium (Flanders) during 2002–2005 // *J. Phytopathol.* 2009. V. 157. P. 108–116.
 89. *Paterson R.R., Lima N.* How will climate change affect mycotoxins in food? // *Food Res. Inter.* 2010. V. 43. P. 1902–1914.
 90. *Ward T., Clear R., Rooney A.* An adaptive evolutionary shift in *Fusarium* head blight pathogen populations is driving the rapid spread of more toxigenic *Fusarium graminearum* in North America // *Fungal Genet. Biol.* 2008. V. 45 (4). P. 473–484.
 91. *Kjaer E.D., McKinney L.V., Nielsen L.R., Hansen L.N., Hansen J.K.* Adaptive potential of ash (*Fraxinus excelsior*) populations against the novel emerging pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus* // *Evolut. Appl.* 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2011.00222.x>
 92. *Gross A., Grünig C.R., Queloz V., Holdenrieder O.* A molecular toolkit for population genetic investigations of the ash dieback pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus* // *Forest Pathol.* 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2011.00751.x>
 93. *Van der Waals J.E., Krüger K., Franke A.C., Haverkort A.J., Steyn J.M.* Climate change and potato production in contrasting South African agro-ecosystems. 3. Effects on relative development rates of selected pathogens and pests // *Potato Res.* 2013. V. 56 (1). P. 67–84.
 94. *Statsyuk N.* Long-term study of the *Phytophthora infestans* population from the Moscow region of Russia (2000–2011) // *Proceedings of the 48th Croatian and 8th International Symposium on Agriculture.* Osijek: University of Josip Juraj Strossmayer, 2013. P. 328–332.
 95. *Kaukoranta T.* Impact of global warming on potato late blight: risk, yield loss and control // *Agricult. Food Sci.* 1996. V. 5. P. 311–327.
 96. *Jung T., Burgess T.I.* Re-evaluation of *Phytophthora citricola* isolates from multiple woody hosts in Europe and North America reveals a new species, *Phytophthora plurivora* sp. nov. // *Persoonia.* 2009. V. 22. P. 95–110.
 97. *Bergot M., Cloppet E., Pérarnaud V., Déqué M., Marçais B., Desprez-Loustau M.-L.* Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change // *Glob. Change Biol.* 2004. V. 10. P. 1539–1552.
 98. *Webber J.F.* Status of *Phytophthora ramorum* and *P. kernoviae* in Europe // *Proceedings of the Sudden Oak Death Third Science Symposium.* 2008. P. 19–26. General technical report PSW-GTR-214.
 99. *Brasier C., Webber J.* Sudden larch death // *Nature.* 2010. V. 466. P. 824–825.
 100. *Webber J.F., Mullett M., Brasier C.M.* Dieback and mortality of plantation Japanese larch (*Larix kaempferi*) associated with infection by *Phytophthora ramorum* // *New Disease Rep.* 2010. V. 22. P. 19.
 101. *Venette R.C., Cohen S.D.* Potential climatic suitability for establishment of *Phytophthora ramorum* within the contiguous United States // *Forest Ecol. Manag.* 2006. V. 231. P. 18–26
 102. *Venette R.C.* Implications of global climate change on the distribution and activity of *Phytophthora ramorum* // *Proceedings of the 20th US Department of Agriculture Interagency Research Forum on Invasive Species.* 2009. P. 58–59. USDA FS, GTR NRS-P-51.
 103. Особенности формирования сорного ценоза в посевах сельскохозяйственных культур // Адаптивно-интегрированная защита растений / Под ред. Спиридонова Ю.Я., Соколова М.С., Глинушкина А.П. М.: Печатный город, 2019. 628 с.
 104. *Singh B.K., Bardgett R.D., Smith P., Reay D.S.* Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options // *Nature Rev. Microbiol.* 2010. V. 8. P. 779–790.
 105. *Pritchard S.G.* Soil organisms and global climate change // *Plant Pathol.* 2011. V. 60. P. 82–89.
 106. *Chakraborty S., Pangga I.B., Roper M.M.* Climate change and multitrophic interactions in soil: The pri-

- macy of plants and functional domains // *Glob. Change Biol.* 2012. V. 18 (7). P. 2111–2125.
107. Lamichhane J.-R. *Xanthomonas arboricola* diseases of stone fruit, almond and walnut trees: progress toward understanding and management // *Plant Disease.* 2014. V. 98. P. 1600–1610.
 108. Lamichhane J.-R., L. Varvaro L. *Xanthomonas arboricola* disease of hazelnut: current status and future perspectives for its management // *Plant Pathol.* 2014. V. 63. P. 243–254.
 109. Howard P.H. Intellectual property and consolidation in the seed industry // *Crop Sci.* 2015. V. 55. № 6. P. 2489–2495.
 110. Schaad N.W. Emerging Plant Pathogenic Bacteria and Global Warming // *Pseudomonas syringae* Pathovars and Related Pathogens – Identification, Epidemiology and Genomics. Dordrecht: Springer, 2008. P. 369–379.
 111. Czajkowski R., Pérombelon M.C.M., van Veen J.A., van der Wol J.M. Control of blackleg and tuber soft rot of potato caused by *Pectobacterium* and *Dickeya* species: a review // *Plant Pathol.* 2011. V. 60 (6). P. 999–1013.
 112. Durgapal J.C., Singh B. Taxonomy of pseudomonads pathogenic to horse-chestnut, wild fig and wild cherry in India // *Indian Phytopathol.* 1980. V. 33. P. 533–535.
 113. Bartoli C., Berge O., Monteil C.L., Guilbaud C., Balestra G.M., Varvaro L. The *Pseudomonas viridiflava* phylogroups in the *P. syringae* species complex are characterized by genetic variability and phenotypic plasticity of pathogenicity-related traits // *Environ. Microbiol.* 2014. V. 16. P. 2301–2315.
 114. Schaad N.W., Sumner D.R., Ware G.O. Influence of temperature and light on severity of bacterial blight of corn, oats, and wheat // *Plant Disease.* 1980. V. 64. P. 481–483.
 115. Holden M.T., Heather Z., Paillot R., Steward K.F. Genomic evidence for the evolution of *Streptococcus equi*: Host restriction, increased virulence, and genetic exchange with human pathogens // *PLoS Pathogens.* 2009. V. 5. E1000346.
 116. Mondal K.K., Mani C., Singh J., Dave S.R., Tipre D.R., Kumar A., Trivedi B.M. Fruit Rot of Tinda Caused by *Pseudomonas aeruginosa* – A New Report from India // *Plant Disease.* 2012. V. 96 (1). P. 141.
 117. Gu G., Hu J., Cevallos-Cevallos J.M., Richardson S.M., Bartz J.A., van Bruggen A.H. Internal colonization of *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* in tomato plants // *PLoS One.* 2011. V. 6 (11). e27340.
 118. Klerks M., Franz E., van Gent-Pelzer M. Differential interaction of *Salmonella enterica* serovars with lettuce cultivars and plant–microbe factors influencing the colonization efficiency // *ISME J.* 2007. V. 1. P. 620–631.
 119. Wright K.M., Crozier L., Marshall J., Merget B., Holmes A., Holden N.J. Differences in internalization and growth of *Escherichia coli* O157:H7 within the apoplast of edible plants, spinach and lettuce, compared with the model species *Nicotiana benthamiana* // *Microbiol. Biotechnol.* 2017. V. 10 (3). P. 555–569.
 120. Baltrus D.A. Exploring the costs of horizontal gene transfer // *Trends Ecol.* 2013. V. 28 (8). P. 489–495.
 121. van Overbeek L., van Elsas J.D. Effects of plant genotype and growth stage on the structure of bacterial communities associated with potato (*Solanum tuberosum* L.) // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2008. V. 64 (2). P. 283–296.
 122. Lipsitch M., Samore M.H. Antimicrobial use and antimicrobial resistance: a population perspective // *Emerg. Infect. Dis.* 2002. V. 8 (4). P. 347–354.
 123. Ohsato S., Miyanishi M., Shirako Y. The optimal temperature for RNA replication in cells infected by Soil-borne wheat mosaic virus is 17 C // *J. General Virol.* 2003. V. 84 (4). P. 995–1000.
 124. Chung B.N., Canto T., Tenllado F., San Choi K., Joa J.H., Ahn J.J., Kim C.H., Do K.S. The effects of high temperature on infection by Potato virus Y, Potato virus A, and Potato leafroll virus // *Plant Pathol. J.* 2016. V. 32 (4). P. 321.
 125. Calvert L.A., Ghabrial S.A. Enhancement by soybean mosaic virus of bean pod mottle virus titer in doubly infected soybean // *Phytopathology.* 1983. V. 73 (7). P. 992–997.
 126. Poolpol P., Inouye T. Enhancement of cucumber mosaic virus multiplication by zucchini yellow mosaic virus in doubly infected cucumber plants // *Nihon Shokubutsu Byori Gakkaiho, Annals of the Phytopathological Society of Japan.* 1986. V. 52 (1). P. 22–30.
 127. Anjos J.R., Jarlfors U., Ghabrial S.A. Soybean mosaic potyvirus enhances the titer of two comoviruses in dually infected soybean plants // *Phytopathology.* 1992. V. 82 (10). P. 1022–1027.
 128. Adams M.J. Transmission of plant viruses by fungi // *Annal. Appl. Biol.* 1991. V. 118 (2). P. 479–492.
 129. Hogenhout S.A., Ammar E.D., Whitfield A.E., Redinbaugh M.G. Insect vector interactions with persistently transmitted viruses // *Annu. Rev. Phytopathol.* 2008. V. 46. P. 327–359.
 130. Stafford C.A., Walker G.P., Ullman D.E. Infection with a plant virus modifies vector feeding behavior // *Proceed. Nat. Acad. Sci.* 2011. V. 108 (23). P. 9350–9355.
 131. Srinivasan R., Alvarez J.M. Effect of mixed viral infections (Potato virus Y-Potato leafroll virus) on biology and preference of vectors *Myzus persicae* and *Macrosiphum euphorbiae* (Hemiptera: Aphididae) // *J. Econ. Entomol.* 2007. V. 100 (3). P. 646–655.
 132. Vø T.T., Dehne H.W., Hamacher J. Transmission of Tomato chlorotic dwarf viroid by *Myzus persicae* assisted by Potato leafroll virus // *J. Plant Diseases Protect.* 2018. V. 125 (3). P. 259–266.
 133. Radcliffe E.B. Insect pests of potato // *Ann. Rev. Entomol.* 1982. V. 27. P. 173–204.
 134. Reynaud B., Peterschmitt M.M. A study of the mode of transmission of MSV by *Cicadulina mbila* using an enzyme-linked immunosorbent assay // *Annal. Appl. Biol.* 2009. V. 121 (1). P. 85–94.
 135. Мусолин Д.Л., Саулич А.Х. Реакции насекомых на современное изменение климата: от физиологии и поведения до смещения ареалов // *Энтомологическое обозрение.* 2012. Т. 91. С. 3–5.

136. *Fernandes M.E.S., Henriques da Silva D.J., Picanço M.C., Fernandes F.L., Jham G.N., Carneiro P.C.S.* Resistance of Tomato Subsamples to *Bemisia tabaci* Biotype B (Genn.) (Hemiptera: Aleyrodidae) // *Agron. J.* 2011. V. 103 (6). P. 1849–1861.
137. *Van der Putten W.H., Macel M., Visser M.E.* Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 2010. V. 365 (1549). P. 2025–2034.
138. *Marshall E.J.P.* Weeds and Biodiversity // *Weed Management Handbook*, Ninth Edition. 2002. P. 75–92.
139. *Castello J., Rogers S., Starmer W.* Detection of tomato mosaic tobamovirus RNA in ancient glacial ice // *Polar. Biol.* 1999. V. 22. P. 207–212.
140. *McClure A.R.* Plant Tissue Associated Microbial Community Composition in a Permafrost Thaw Zone // *Partial Fulfillment of the Prerequisite for Senior Thesis Research in Department of Biological Sciences*. 2016. 76 p.
141. *Ozerskaya S., Kochkina G., Ivanushkina N., Gilichinsky D.A.* Fungi in Permafrost // *Permafrost Soils. Soil Biology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. V. 16.
142. *Hoshino T., Morita H., Yajima Y., Tsuji M., Tkachenko O.B.* Snow Molds and Their Antagonistic Microbes in Polar Regions // *Fungi in Polar Regions*. CRC Press, 2019. P. 30–43.
143. *Morris C.E., Sands D.C., Vinatzer B.A., Glaux C., Guilbaud C., Buffiere A., Yan S., Dominguez H., Thompson B.M.* The life history of the plant pathogen *Pseudomonas syringae* is linked to the water cycle // *ISME J.* 2008. V. 2 (3). P. 321–34.
144. *Morris C.E., Sands D.C., Vanneste J.L., Montarry J., Oakley B., Guilbaud C., Glaux C.* Inferring the evolutionary history of the plant pathogen *Pseudomonas syringae* from its biogeography in headwaters of rivers in North America, Europe, and New Zealand // *MBio*. 2010. V. 1 (3). e00107–10.
145. *Trumble J.T., Butter C.D.* Climate change will exacerbate California's insect pest problems // *Calif. Agric.* 2009. V. 63. P. 73–78.
146. *Chakraborty S.* Migrate or evolve: Options for plant pathogens under climate change // *Glob. Change Biol.* 2013. V. 19 (7). P. 1985–2000.
147. *Hannukkala A.O., Kaukoranta T., Lehtinen A., Rahkonen A.* Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933–2002; increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation // *Plant Pathol.* 2007. V. 56. P. 167–176.
148. *Carlton R.R., West J.S., Smith P., Fitt B.D.L.* A comparison of GHG emission from UK field crop production under selected arable systems with reference to disease control // *Eur. J. Plant Pathol.* 2012. V. 133. P. 333–351.
149. *Chen C.C., McCarl B.A.* An investigation of the relationship between pesticide usage and climate change // *Climat. Change*. 2001. V. 50. P. 475–487.
150. *Bloomfield J.P., Williams R.J., Goody D.C., Cape J.N., Guha P.* Impacts of climate change on the fate and behavior of pesticides in surface and groundwater – a UK perspective // *Sci. Total Environ.* 2006. V. 369. P. 163–177.
151. *Bailey S.W.* Climate change and decreasing herbicide resistance // *Pest Manag. Sci.* 2004. V. 60. P. 158–162.
152. *Elad Y., Pertot I.* Climate change impact on plant pathogens and plant diseases // *J. Crop Improv.* 2014. V. 28 (1). P. 99–139.
153. *Bowes G.* Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO₂ // *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 1993. V. 44. P. 309–332.
154. *Ghini R., Hamada E., Bettiol W.* Climate change and plant diseases // *Scientia Agricola*. 2008. V. 65 (special issue). P. 98–107.

Impact of Global Climate Change on Plant Pathogens Occurrence

A. N. Ignatov^{a,b}, E. I. Koshkin^{c,#}, I. V. Andreeva^c, G. G. Guseinov^d,
K. G. Guseinov^e, and F. S.-U. Dzhaliyov^c

^a LLC “Research Center “PhytoEngineering”
ul. Moskovskaya 58, Moscow region, s. Rogachevo 143880, Russia

^b Russian University of People's Friendship
ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russia

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

^d Group of Companies HH group, shosse Khyrdalan-Binagadi 34N
AZ1102 Baku, Republic of Azerbaijan

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

#E-mail: ekoshkin@rgau-msha.ru

Possible tendencies in the distribution and harmfulness of phytopathogens in the world under different scenarios of climate change are reviewed. Effects of enhanced temperature, carbon dioxide and ozone concentrations separately and in combination on the phytopathogen's distribution and harmfulness are analyzed.

Key words: climate change, phytopathogens, plant diseases, vectors.