

Номер 5

ISSN 0002-1881

Май 2023



АГРОХИМИЯ

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

Влияние технологий основной обработки почвы на трансформацию азотсодержащих органических соединений в агрочерноземе и активность ферментов азотного цикла

Е. Н. Белоусова, А. А. Белоусов

3

Изменение плодородия аллювиальной луговой почвы при разных системах удобрения в овощном севообороте

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

13

Удобрения

Влияние минеральных удобрений на динамику накопления биомассы и роста растений озимой ржи

С. Е. Витковская, К. Ф. Шаврина

20

Влияние применения фосфорного удобрения на варьирование прибавок урожайности сельскохозяйственных культур в условиях Зауралья

О. В. Волынкина

27

Регуляторы роста растений

Эффективность композиции на основе регулятора роста флорексан с глицирризиновой кислотой при выращивании хлопчатника и баклажана

Р. П. Закирова, С. С. Халиков, С. М. Тураева, Э. Р. Курбанова, Н. Д. Чкаников

34

Пестициды

Монтмориллонит как эффективный стимулятор развития растений в почве, загрязненной метсульфуридом-метилом

Н. Д. Чкаников, А. В. Пастухов, В. А. Абубикеров, Г. С. Босак, А. П. Глинушкин

41

Агроэкология

Исследование почвенного биота молодого яблоневого сада интенсивного типа

Е. В. Бондарева, Л. Г. Серая, Г. Е. Ларина

45

Гуминовые почвомодификаторы из торфа и угля: влияние на химические и биологические свойства модельных почвосмесей

А. А. Степанов, О. С. Якименко

53

Экотоксикология

Оценка фитотоксичности чернозема обыкновенного при применении *Bacillus* sp. и биочара для стимуляции разложения пожнивных остатков озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.)

Т. В. Минникова, Н. С. Минин, С. И. Колесников, А. В. Горюнов, В. А. Чистяков

60

Влияние хлоридного засоления на проростки ячменя

К. Б. Таскина, Н. М. Казнина, А. Ф. Титов

70

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Способ получения, исследование структуры и механических свойств композиционного материала “хитозан—диоксид титан” сельскохозяйственного назначения

А. С. Баикин, А. А. Мельникова, А. В. Михайлова, М. А. Каплан, Е. О. Насакина, К. В. Сергиенко, С. В. Кошушкин, Е. П. Севостьянова, Е. В. Степанова, С. В. Железова, А. П. Глинушкин, М. А. Севостьянов

77

ОБЗОРЫ

Роль бактерий рода *Pseudomonas* и их метаболитов в биоконтроле фитопатогенных микроорганизмов

Т. М. Сидорова, В. В. Аллахвердян, А. М. Асатурова

83

Правила для авторов

94

Contents

No. 5, 2023

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Influence of Basic Tillage Technologies on the Transformation of Nitrogen-Containing Organic Compounds in Agrochernozem and the Activity of Nitrogen Cycle Enzymes
E. N. Belousova, A. A. Belousov 3

- Changes in Fertility of Alluvial Meadow Soil under Different Fertilizer Systems in Vegetable Crop Rotation
I. Yu. Vasyuchkov, V. A. Borisov, O. N. Uspenskaya 13

Fertilizers

- Influence of Mineral Fertilizers on the Dynamics of Biomass Accumulation and Plant Growth of Winter Rye
S. E. Vitkovskaya, K. F. Shavrina 20

- Effect of the Use of Phosphorus Fertilizer on the Variation of Crop Yield Increments in the Conditions of the Trans-Urals
O. V. Volynkina 27

Plant Growth Regulators

- Efficiency of a Composition Based on the Growth Regulator Floroxan with Glycyrrhizic Acid in Growing Cotton and Eggplant
R. P. Zakirova, S. S. Khalikov, E. R. Kurbanova, S. M. Turaeva, N. D. Chkanikov 34

Pesticides

- Montmorillonite as an Effective Stimulator of Plant Development in Soil Contaminated with Metsulfuron-Methyl
N. D. Chkanikov, A. V. Pastukhov, V. A. Abubikero, G. S. Bosak, A. P. Glinushkin 41

Agroecology

- Research of Soil Biome of a Young Apple Orchard of Intensive Type
E. V. Bondareva, L. G. Seraya, G. E. Larina 45

- Humic-Based Soil Modifiers from Peat and Coal: Effect on Chemical and Biological Properties of Model Soil Mixtures
A. A. Stepanov, O. S. Yakimenko 53

Ecotoxicology

- Evaluation of Phytotoxicity of Common Chernozem in the Application of *Bacillus* sp. and Biochar for Stimulation of Decomposition of Winter Wheat Harvest Residues (*Triticum aestivum* L.)
T. V. Minnikova, N. S. Minin, S. I. Kolesnikov, A. V. Gorovtsov, V. A. Chistyakov 60

- Effect of Chloride Salinization on Barley Seedlings
K. B. Taskina, N. M. Kaznina, A. F. Titov 70

RESEARCH METHODS

- Method of Preparation, Study of the Structure and Mechanical Properties of the Composite Material "Chitosan-Titanium Dioxide" for Agricultural Use
A. S. Baikin, A. A. Melnikov, A. V. Mikhailova, M. A. Kaplan, E. O. Nasakin, K. V. Sergienko, S. V. Konushkin, E. P. Sevostyanova, E. V. Stepanova, S. V. Zhelezova, A. P. Glinushkin, M. A. Sevostyanov 77

REVIEWS

- Role of Pseudomonas Bacteria and Their Metabolites in the Biocontrol of Phytopathogenic Microorganisms
T. M. Sidorova, V. V. Allahverdyan, A. M. Asaturova 83

- Rules for authors 94

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В АГРОЧЕРНОЗЕМЕ И АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ АЗОТНОГО ЦИКЛА

© 2023 г. Е. Н. Белоусова¹, А. А. Белоусов^{1,*}

¹Красноярский государственный аграрный университет
660049 Красноярск, просп. Мира, 90, Россия

*E-mail: svoboda57130@mail.ru

Поступила в редакцию 19.09.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Оценили влияние отвальной и минимальных технологий обработки агрочерноземов на активность ферментов азотного цикла, и их роль в превращении азотсодержащих органических соединений. Наиболее значимые различия в сезонной динамике содержания фракции трудногидролизуемых соединений азота обнаружены в почве агроценоза ячменя при всех видах обработки почвы. При использовании поверхностного дискования динамика их содержания была обусловлена активностью протеазы. Выявлена высокая обеспеченность почвы легкогидролизуемым азотом, что указывало на отсутствие потребности в азотных удобрениях. Зависимость динамики содержания легкогидролизуемых соединений азота от активности протеазы была неоднозначной. В условиях применения минимальной обработки почвы формирование легкогидролизуемых соединений азота находилось в обратной зависимости от процесса протеолиза. Плоскорезный способ рыхления обусловил повышение уровня активности уреазы относительно отвальной вспашки и поверхностного дискования.

Ключевые слова: способы обработки почвы, азотсодержащие органические соединения, ферментативная активность почвы, протеаза, уреазы.

DOI: 10.31857/S0002188123020047, **EDN:** MRZGIQ

ВВЕДЕНИЕ

Процессы превращения азота в почвах Сибирского региона заторможены суровыми биоклиматическими условиями, при которых значительная часть азотсодержащих соединений превращается в “мертвый” азотный фонд, исключается из биологического круговорота и питания растений [1–3]. Применение почвозащитной системы земледелия предусматривает сокращение интенсивности и глубины воздействия обрабатывающих орудий на почву, что способствует локализации органических остатков, ухудшению аэрации нижних горизонтов и послойной дифференциации биологических процессов. Перестройка почвенной биоты приводит к изменению режима азотистых соединений и снижению азотомобилизующей способности почв [4–9]. В связи с этим актуальным является вопрос о роли ферментативной активности почвы в процессах трансформации азотсодержащих органических соединений в условиях бесплужной обработки. Напри-

мер, активность протеолиза обуславливает процессы разложения поступающих в почву растительных остатков и обеспечение растений доступными источниками азота [10].

Цель работы — исследование динамики содержания азотсодержащих органических соединений и активности ферментов азотного цикла при использовании отвальной и поверхностных способов обработки черноземов Красноярской лесостепи.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в производственном опыте ООО ОПХ “Дары Малиновки” Сухобузимского р-на в Красноярской лесостепи, размещенном в пределах Чулымо-Енисейского денудационного плато юго-западной окраины Средней Сибири (56°10'с.ш. и 91°47'в.д.). В границах производственных посевов были заложены реперные участки прямоугольной формы общей площадью

Таблица 1. Метеорологические показатели в годы опыта

Год	Месяц					Сумма активных температур, °С
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
Средняя температура воздуха, °С						
2017	11.0	20.3	19.5	16.8	8.5	2074
2018	8.1	20.5	18.6	18.3	10.1	2061
2019	9.0	18.7	19.5	18.8	9.9	2047
Норма (1961—1990 гг.)	8.7	15.2	17.6	14.8	8.8	1833
Осадки, мм						
						Сумма осадков, мм
2017	28.0	30.0	79.0	81.0	81.0	299.0
2018	29.0	29.0	33.0	21.0	58.0	170.0
2019	8.3	106.1	45.4	68.9	54.0	274.4
Норма (1961—1990 гг.)	50.0	61.0	95.0	78.0	48.0	332.0

1200 м² с учетной площадью 600 м². В пределах каждого участка выделяли 3 повторности, площадью 200 м². Выбор элементов методики полевого опыта обусловлен влиянием внутрипольной неоднородности почвенного плодородия опытного стационара [11]. Почвенные пробы отбирали в сроки, приуроченные к фазам развития сельскохозяйственных культур, из слоев 0–10 и 10–20 см методом змейки. Объем выборки был рассчитан, исходя из уровня варьирования плодородия почвы по результатам рекогносцировочных посевов и составил $n = 12$. Наблюдения проводили в звене севооборота: пар – яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) – ячмень (*Hordeum vulgare* L.). Для исследования были выбраны следующие варианты: 1 – отвальная (st) вспашка на глубину 25–27 см плугом Gregoire Besson SPLM B9. В вегетационном сезоне 2017 г. почву обрабатывали в 1-ю декаду июня по типу раннего пара, с последующими культивациями на глубину 5–7 см по мере отрастания сорных растений. Далее, в 2018 г. применяли вспашку на глубину 25–27 см с предпосевной культивацией на 5–7 см агрегатом АПК-7.2 + БЗТС-1;

2 – минимальная (поверхностное дискование) обработка дискатором БДМ-Агро БДМ 6 × 4П на глубину 10–12 см. В 2017 г. почву обрабатывали по типу стернового пара, в 2018 г. – боронованием с предпосевной культивацией на 5–7 см агрегатом АПК-7.2 + БЗТС-1;

3 – плоскорезная (культивация) обработка культиватором Ярославич КБМ-10.8 ПС-4 на глубину 10–12 см; в 2017 г. почву обрабатывали по типу стернового пара, на следующий год – боронованием с предпосевной культивацией на 5–7 см агрегатом АПК-7.2+БЗТС-1. В 2018 г. на опытном поле возделывали яровую пшеницу сорта Ново-

сибирская-31, в вегетационный сезон 2019 г. – ячмень сорта Ача.

Химические и физико-химические показатели почвы определяли по методикам, изложенным в [12]. В подготовленных образцах определяли органический углерод по Тюрину ($C_{орг}$), подвижный фосфор и обменный калий – по Чирикову, содержание трудно- ($N_{тп}$) и легкогидролизуемого ($N_{лт}$) азота – по Корнфилду [13]. Ферментативную активность почвы определяли следующими методами: уреазную активность – колориметрическим методом учета аммония с реактивом Несслера, выраженного в мг N-NH₄/кг почвы/сут, протеазную активность – методом Гоффмана и Тейхера [14] в мг аминного азота/г почвы/20 ч.

Объект исследования – чернозем обыкновенный среднегумусный среднемощный тяжелосуглинистый на красно-бурой глине. Почва опыта в пахотном слое содержала 6.5% органического углерода, подвижного фосфора – 295–320 и обменного калия (по Чирикову) – 127–138 мг/кг, рН_{H₂O} был близок к нейтральному (рН_{H₂O} 6.7).

Оценку полученных данных протеолитической активности исследованной почвы проводили по шкале сравнительной характеристики биохимической активности [15]. Статистический анализ данных проводили методом однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа с использованием пакета программ MS Excel.

Агрометеорологические условия вегетационных сезонов 2017–2019 гг. показаны в табл. 1. Сумма активных температур была значительно выше среднемноголетних показателей, а количество осадков, напротив, существенно уступало норме. Вторая половина лета первого года исследования (2017 г.) характеризовалась значитель-

ным количеством осадков относительно 2018 и 2019 гг. наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главным источником почвенного азота является органическое вещество, в состав которого азот входит в виде более и менее устойчивых соединений. Гидролизующиеся соединения азота состоят из легко- и трудногидролизующихся фракций. Роль различных форм азотистых веществ в формировании азотного режима почвы и питания растений неодинакова. Фракция трудногидролизующегося азота является резервом для пополнения фонда подвижных азотных соединений. Выявлено преобладание трудногидролизующихся форм над легкогидролизующимися, что объясняется высокой устойчивостью почв Сибири к гидролизу [16]. В условиях парования содержание азота трудногидролизующей фракции ($N_{\text{т}}$) указывало на незначительную его динамику и отсутствие существенных различий в вегетационный период 2017 г. Динамика распределения $N_{\text{т}}$ по слоям почвы была слабой за счет равномерного распределения органических соединений, отсутствия поступления свежих порций растительного материала и потребления азота культурами (рис. 1).

При использовании отвальной вспашки под посевами яровой пшеницы обнаружено существенное уменьшение содержания фракции азотистых соединений, переходящих в 6 н. NaOH, к июлю и достоверное увеличение этого показателя в конце вегетационного сезона 2018 г. Подобные тенденции к изменению динамики содержания трудногидролизующихся соединений азота наблюдали и в слое почвы 10–20 см.

Сокращение интенсивности и глубины воздействия обрабатывающих орудий на почву определяет постепенное снижение интенсивности накопления $N_{\text{т}}$. Очевидно, разрыхление поверхностного слоя, преимущественное поступление в этот слой пожнивных остатков и уплотнение нижней части обрабатываемого слоя является причиной замедления процессов мобилизации питательных веществ. Малая подвижность азота связана с длительным сохранением неразложившихся растительных остатков, с преимущественным содержанием гуминов и гуминовых кислот в составе гумуса и повышенной степенью конденсированности их ароматического ядра [1]. Наиболее значимые различия в сезонном ритме изменений содержания фракции трудногидролизующихся соединений азота были найдены в почве агроценоза ячменя. Амплитуда сезонных изменений содержания трудногидролизующихся соединений азо-

та в почве вариантов опыта указывала на схожий характер их превращений. Заметное накопление данной фракции азота наблюдали в фазе цветения ячменя. В дальнейшем отмечено несущественное уменьшение содержания трудногидролизующихся соединений азота. По-видимому, двухлетнее наложение обработок без оборота пласта обусловило изменения в содержании подвижных гумусовых соединений: значительное снижение концентрации углерода гуминовых кислот и увеличение доли фульвосоединений (фульватизация) в почве всех вариантов опыта. В фазе цветения ячменя разложение растительного материала в почве, где использовали дисковые орудия и отвальный плуг, сопровождалось формированием примерно равных показателей содержания гуминоподобных соединений. Тогда как в условиях плоскорезной технологии отмечен достоверно низкий уровень содержания подвижных гуминовых кислот в сравнении с вариантами контроля и дискования. В конце вегетационного сезона в слоях 0–10 и 10–20 см выявлена тенденция к увеличению содержания молодых гуминовых кислот при плоскорезной обработке относительно почвы, обработанной дискатором. Очевидно, темп гумификации растительных остатков в верхней части почвенного профиля в условиях применения безотвальных технологий замедлялся. Благодаря постоянному обновлению системы гумусовых веществ, происходил обмен азотсодержащими периферическими группировками или, как показали опыты [17], одновременный переход азотистых структур из подвижных фракций в малоподвижные и наоборот.

Обобщая обсуждение процессов трансформации трудногидролизующихся соединений азота, отметим, что динамика их содержания определялась активностью фермента протеазы только при использовании поверхностного дискования. Это свидетельствовало о наличии других причинно-следственных связей при трансформации данных соединений в данных почвенно-метеорологических условиях.

Одной из основных форм подвижного почвенного азота является фракция легкогидролизующегося азота. Согласно агрономической оценке, легкогидролизующийся азот составляет ближайший резерв для питания растений. Динамика его содержания обусловлена неодинаковой интенсивностью минерализации азотсодержащего органического вещества. В течение летнего периода 2017 г. в почве исследованных вариантов наблюдали тенденцию к уменьшению содержания щелочногидролизующегося азота. В нижней части обрабатываемого слоя (10–20 см) зафиксировано накопле-

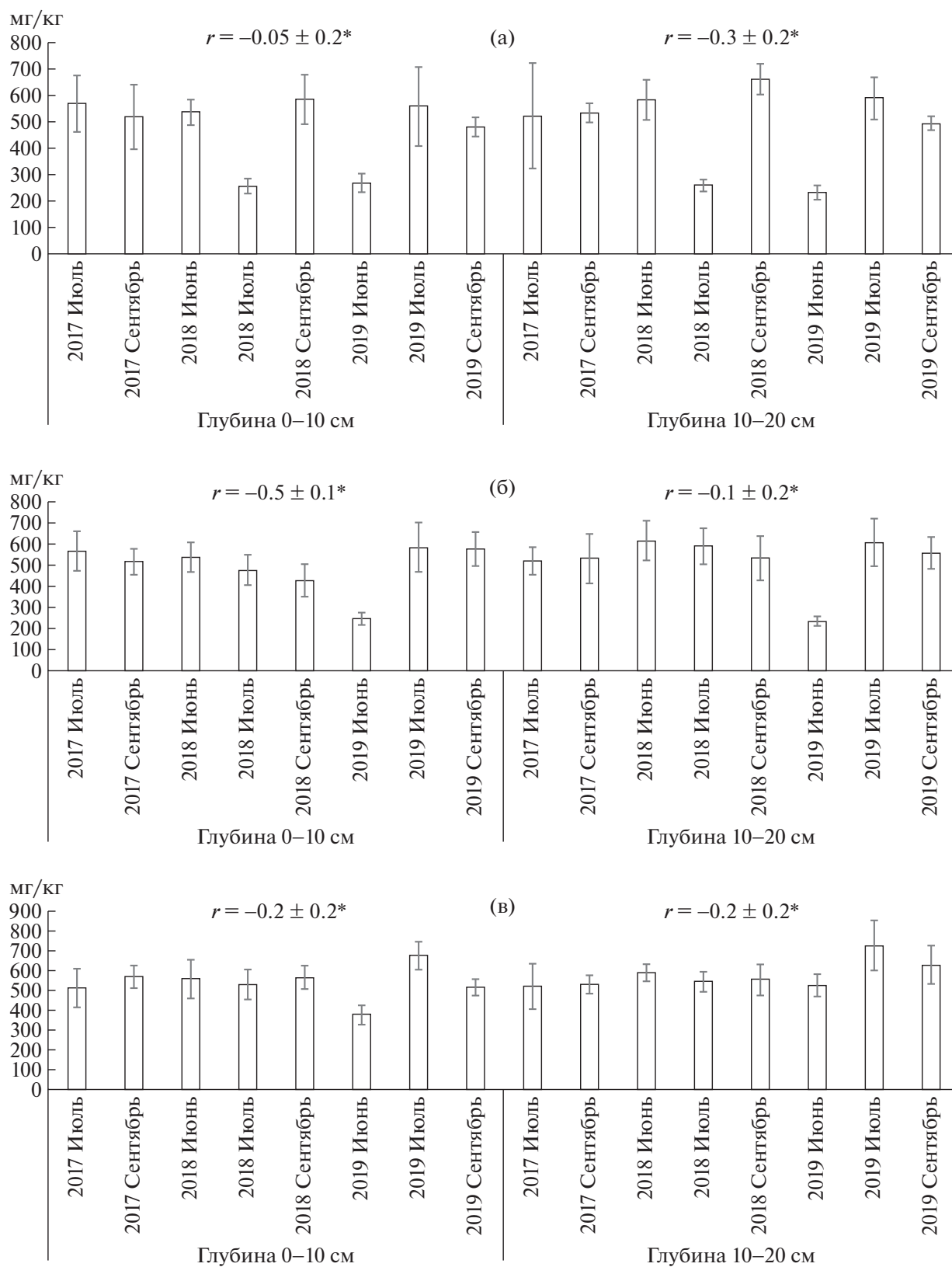


Рис. 1. Динамика содержания трудногидролизуемых соединений азота (мг/кг): (а) — отвальная обработка, (б) — минимальная обработка, (в) — плоскорезная обработка. *Корреляционная зависимость между содержанием $N_{\text{тг}}$ и протеазной активностью почвы.

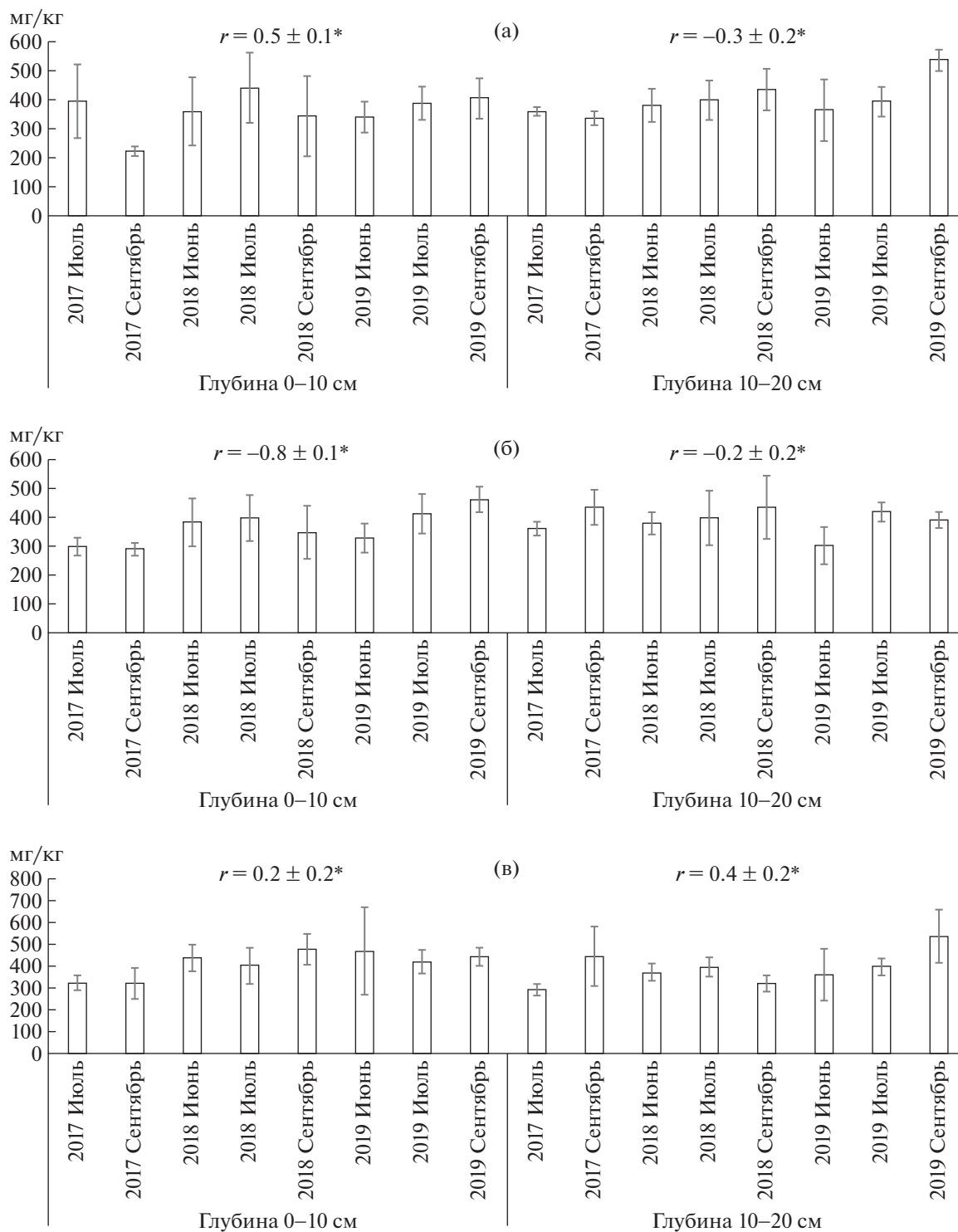


Рис. 2. Динамика содержания легкогидролизуемых соединений азота (мг/кг): (а) – отвальная обработка, (б) – минимальная обработка, (в) – плоскорезная обработка. *Корреляционная зависимость между содержанием $N_{\text{лг}}$ и протеазной активностью почвы.

ние фракции легкогидролизуемых азотистых соединений (рис. 2).

В осенний период достоверный минимум накопления этой фракции отмечен в почве с обра-

боткой отвальным плугом. Это было связано с отсутствием поступления свежего растительного вещества в почву, а также с особенностями перераспределения растительного материала в пахот-

Таблица 2. Активность почвенной протеазы пахотного слоя чернозема обыкновенного, мг аминного азота/10 г почвы/20 ч (2017 г.)

Вариант	Июнь (фон)		Июль		Сентябрь	
	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см
1. Отвальная вспашка (st)	—	—	21.4	23.6	17.6	21.1
2. Минимальная обработка (дискование)	—	—	19.2	16.8	13.5	17.6
3. Плоскорезная обработка (культивация)	—	—	18.6	18.3	16.6	18.5
HCP_{05}			$F_{\phi} < F_T$	4.1	2.7	$F_{\phi} < F_T$

ном слое при разных видах механической обработки. Использование культиваторов-плоскорезов сопровождалось разнонаправленностью превращения органических соединений азота и приводило в осенний период к компенсации их потерь и заметной аккумуляции в слое почвы 10–20 см.

В течение вегетационного сезона 2018 г. максимальное содержание фракции легкогидролизуемых соединений азота обнаружено в надсеменной части почвы, обработанной отвальными и дисковыми орудиями, в фазе цветения яровой пшеницы. При плоскорезной обработке максимум накопления легкогидролизуемой фракции азота наблюдали в сентябре в слое 0–10 см и его содержание достоверно уменьшалось в слое почвы 10–20 см.

Иной характер трансформации легкогидролизуемых соединений азота отмечен в агрочерноземе под посевами ячменя. Послеуборочное пополнение мортмассы пожнивно-корневыми остатками зерновой культуры, отмершими корнями сопровождалось значительными изменениями содержания соединений, переходящих в 1.0 н. NaOH. Максимум их образования приходился на слой 10–20 см в период уборки ячменя при обработке почвы отвальным плугом и плоскорезными орудиями. Применение дискаторов обнаружило заметный азотминерализующий потенциал надсеменного слоя почвы.

Характер обработки агрочерноземов определяет особенности в распределении растительных остатков в обрабатываемом слое и специфику процессов превращения органического вещества. Непродолжительное (в течение 2–3 лет) применение обработок почвы без оборота пласта выявило наличие разнокачественности слоев по величине аккумуляции органических форм азота. Показатели корреляционной зависимости легкогидролизуемых соединений азота с активностью протеазы были неоднозначными (рис. 2). Полученные данные в контрольном варианте свиде-

тельствовали о средней зависимости накопления $N_{\text{лг}}$ от уровня активности протеолитических ферментов в слое 0–10 см, для более глубокого слоя связь менялась на обратную. В условиях применения минимальной обработки почвы формирование легкогидролизуемых соединений азота находилось в обратной корреляционной зависимости от активности протеолиза.

Ферментативная активность почв отражает общую биогенность, указывает на специфику превращения азота и характер пищевого режима в почве. Установлено, что для черноземов ферментом, определяющим скорость всей цепи превращения азоторганических соединений, вплоть до образования минеральных форм, является протеаза [18].

Показано, что характер динамики протеолитической активности в течение вегетационного сезона 2017 г. на разных фонах обработки почвы был идентичным (табл. 2). Амплитуда изменений этого показателя в слое 0–10 см почвы, обработанной отвальным плугом, была существенно больше, чем при применении минимальных способов обработки. Снижение активности протеазы показано в конце вегетационного сезона и было обусловлено дефицитом легкоминерализуемых азотосодержащих органических соединений. Вероятно, глубокая обработка агрочерноземов в парующем поле формировала более мощный пахотный слой, обеспечивала лучшую аэрацию толщи в результате дробления почвенных отдельностей.

Существенно меньшая активность протеолиза отмечена в условиях применения дисковых орудий обработки почвы. В сентябре, когда снижалась температура и обеспеченность влагой (табл. 1), возрастала плотность сложения почвы, слой 0–10 см отличался наименьшей ферментативной активностью.

Под посевами яровой пшеницы, следовавшей после парового поля, протеазная активность ха-

Таблица 3. Активность почвенной протеазы пахотного слоя чернозема обыкновенного, мг аминного азота/10 г почвы/20 ч (2018 г.)

Вариант	Июнь (фон)		Июль		Сентябрь	
	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см
1. Отвальная вспашка (st)	18.4	18.6	19.4	21.0	17.4	19.5
2. Минимальная обработка (дискование)	19.0	19.2	19.1	19.8	16.1	15.9
3. Плоскорезная обработка (культивация)	20.5	19.9	19.1	20.8	19.2	17.8
HCP_{05}	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	2.0	$F_{\phi} < F_T$

Таблица 4. Активность почвенной протеазы пахотного слоя чернозема обыкновенного, мг аминного азота/10 г почвы/20 ч (2019 г.)

Вариант	Июнь (фон)		Июль		Сентябрь	
	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см
1. Отвальная вспашка (st)	18.8	19.3	19.4	23.0	20.0	20.2
2. Минимальная обработка (дискование)	20.9	18.0	18.8	16.9	15.6	15.9
3. Плоскорезная обработка (культивация)	18.3	16.1	17.3	16.2	19.5	19.4
HCP_{05}	1.6	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	1.8	1.4	0.9

рактировалась равноценными показателями во всех вариантах опыта (табл. 3).

Поверхностная обработка почвы дисковыми орудиями определила достоверное снижение активности протеазы в слое 0–10 см к концу жизненного цикла яровой пшеницы. Плоскорезное рыхление на глубину 10–12 см способствовало существенному повышению ферментативной активности в слое 0–10 см.

В течение следующего вегетационного сезона в целом, активность гидролитических процессов в почве снижалась при использовании безотвальных способов обработки (табл. 4). Наибольшей величиной протеолиза характеризовалась почва при ежегодной отвальной вспашке. Оптимальные условия для осуществления гидролитических и окислительно-восстановительных протеолитических процессов складывались на фоне вспашки и плоскорезного рыхления.

Поверхностное дискование на глубину 10–12 см под посевами ячменя сопровождалось постепенным уменьшением активности протеазы в течение летнего периода. По мнению [19], снижение ферментативной активности по мере минимизации обработки почвы обусловлено сокращением поступления ферментных белков из растительных остатков и микробных клеток. Торможение

этих процессов при сокращении глубины и частоты обработки почвы связано и с уменьшением механического заражения почвы микробными клетками, которое происходит при перемешивании ее плугом, а также с обеднением свежим органическим веществом нижней части пахотного слоя. По-видимому, особенности перераспределения растительного материала в корнеобитаемом слое в условиях применения безотвальных обработок агрочерноземов обусловили преимущественно микробиологический характер продуцирования почвенной протеазы. Деятельность корневой системы злаковых культур не оказывала существенного ризосферного эффекта на активность протеолиза в почве исследованных вариантов опыта. Сохранение стабильной протеазной активности свидетельствует о создании условий для обеспечения почвенной биоты доступными источниками азота [10].

Следующая стадия превращения азоторганических соединений связана с действием фермента уреазы. Аммоний, образовавшийся в результате уреазной реакции, служит источником питания растений и почвенных микроорганизмов. Содержание почвы под паром, где складывались благоприятные условия для превращения растительных остатков, обуславливало накопление значительного количества азота. На рассмотренных

Таблица 5. Динамика активности уреазы пахотного слоя чернозема обыкновенного, мг мочевины/10 г почвы/24 ч (2017 г.)

Вариант	Июнь (фон)		Июль		Сентябрь	
	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см
1. Отвальная вспашка (st)	—	—	119	150	1.5	0
2. Минимальная обработка (дискование)	—	—	92	84	0.5	2
3. Плоскорезная обработка (культивация)	—	—	76	3	0.5	17
HCP_{05}			17	26	0.6	5

Таблица 6. Динамика активности уреазы пахотного слоя чернозема обыкновенного, мг мочевины/10 г почвы/24 ч (2018 г.)

Вариант	Июнь (фон)		Июль		Сентябрь	
	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см
1. Отвальная вспашка (st)	5	3	1	2	0	1
2. Минимальная обработка (дискование)	8	11	14	5	4	19
3. Плоскорезная обработка (культивация)	6	10	4	2	6	27
HCP_{05}	$F_{\phi} < F_T$	4	3	2	2	8

Таблица 7. Динамика активности уреазы пахотного слоя чернозема обыкновенного, мг мочевины/10 г почвы/24 ч (2019 г.)

Вариант	Июнь (фон)		Июль		Сентябрь	
	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см	0–10 см	10–20 см
1. Отвальная вспашка (st)	23	9	8	8	18	13
2. Минимальная обработка (дискование)	8	16	9	22	13	13
3. Плоскорезная обработка (культивация)	33	14	39	50	25	31
HCP_{05}	9	$F_{\phi} < F_T$	8	7	5	5

фонах обработки агрочерноземов уровень уреазной активности соответствовал очень высокой напряженности биохимических процессов согласно шкале [20] с последующим ее снижением в сентябре до очень бедной (табл. 5).

При применении отвальной обработки обнаружена максимальная активность уреазы. Это указывало на высокую обогащенность почвы варианта мочевиной. Вероятно, к концу вегетационного сезона запас этого легкодоступного субстрата исчерпывался. Сокращение механического перемешивания почвы приводило к изменениям в метаболизме азотсодержащих органических соеди-

нений, замедляя их трансформацию в почвенной толще.

В 2018 г. наибольшее замедление процесса разложения мочевины выявили в почве, обработанной отвальной плугом, на протяжении всей вегетации яровой пшеницы (табл. 6).

Замена отвальной вспашки дисковыми орудиями обеспечила заметное увеличение уреазной активности в слое 0–10 см в фазе цветения яровой пшеницы. Применение плоскорезной культивации сопровождалось увеличением активности уреазы преимущественно на глубине 10–20 см. Одним из факторов, обуславливающих такое изменение, по мнению [21], было сосредоточение в

слое 10–20 см почвы корневых систем растений, обогащающих его биологически активными веществами и стимулирующими развитие микрофлоры. Под посевами ячменя, следовавшими после яровой пшеницы, уреазная активность была существенно больше при применении плоскорезной обработки (табл. 7). В свою очередь, применение дисковых орудий значимо ослабляло процесс гидролиза мочевины и смещало его максимум на глубину 10–20 см. Таким образом, плоскорезный способ рыхления обусловил повышение уровня активности уреазы относительно отвальной вспашки и поверхностного дискования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значимые различия в сезонной динамике содержания фракции трудногидролизуемых соединений азота были выявлены в почве агроценоза ячменя при всех способах обработки агрочернозема. Их динамика определяла активность протеазы при использовании поверхностного дискования. Зависимость содержания легкогидролизуемых соединений азота от активности протеазы была неоднозначной. При применении минимальной обработки формирование легкогидролизуемых соединений азота находилось в сильной обратной корреляционной зависимости от активности протеолиза. Плоскорезная обработка обусловила повышение уровня активности уреазы относительно отвальной вспашки и поверхностного дискования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаков П.С., Чупрова В.В. Содержание и качественный состав гумуса в основных почвах Красноярской лесостепи // Почвоведение. 1970. № 12. С. 46–55.
2. Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981. 267 с.
3. Коротких Н.А., Власенко Н.Г., Кастючик С.П. Динамика содержания нитратного азота в почве под посевами пшеницы, возделываемой по технологии no-till в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2016. № 7. С. 12–18.
4. Данилова А.А. Ферментативная активность как показатель динамики мобильных органических веществ в выщелоченном черноземе Приобья при минимизации его основной обработки // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2007. № 1(169). С. 14–21.
5. Синещев В.Е., Ткаченко Г.И. Влияние минимизации основной обработки почвы на азотный режим чернозема выщелоченного и продуктивность яровой пшеницы в зернопаровом севообороте // Агрохимия. 2016. № 1. С. 59–64.
6. Данилова А.А. Сочетание естественных и антропогенных факторов в формировании свойств выщелоченного чернозема при почвозащитной обработке // Агрохимия. 2013. № 8. С. 45–53.
7. Гамзиков Г.П. Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск, 2013. 790 с.
8. Завалин А.А., Дриггер В.К., Белобров В.П., Юдин С.А. Азот в черноземах при традиционной технологии обработки и прямом посеве (обзор) // Почвоведение. 2018. № 12. С. 1506–1516.
9. Белоусова Е.Н., Белоусов А.А. Трансформация азотсодержащих соединений чернозема выщелоченного в условиях минимизации основной обработки // Пробл. агрохим. и экол. 2021. № 3–4. С. 3–8.
10. Вершинин А.А., Калимуллин Л.К., Петров А.М. Протеазная активность загрязненной нефтью светло-серой лесной почвы в условиях длительного эксперимента // Химия и инженерная экология – XVIII: сб. тр. Международ. научн. конф. Казань, 2018. С. 397–399.
11. Белоусов А.А., Белоусова Е.Н. Влияние внутрипольной неоднородности почвенного плодородия на выбор элементов методики полевого опыта // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 6. С. 55–62.
12. Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
13. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 655 с.
14. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 251 с.
15. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества. Нижний Новгород, 2012. 64 с.
16. Пигарева Н.Н., Корсунов В.М. Агрохимия почв криолитозоны Забайкалья. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2004. 204 с.
17. Помазкина Л.В., Зорина С.Ю. Иммобилизация азота удобрений и трансформация его в составе гумусовых веществ почв лесостепи Средней Сибири // Проблема азота в интенсивном земледелии: тез. докл. Всесоюз. совещ. Новосибирск, 1990. С. 143.
18. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. 2018. Т. 1. № 2. С. 80–92.
19. Кирюшин В.И., Данилова А.А. Биологическая активность выщелоченного чернозема Приобья в связи с интенсификацией возделывания зерновых культур // Агрохимия. 1990. № 9. С. 79–86.
20. Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2012. 260 с.
21. Зинченко С.И., Бучкина Н.П. Влияние приемов основной обработки серой лесной почвы на эмиссию азота // Владимир. земледелец. 2018. № 4 (86). С. 7–11.

Influence of Basic Tillage Technologies on the Transformation of Nitrogen-Containing Organic Compounds in Agrochernozem and the Activity of Nitrogen Cycle Enzymes

E. N. Belousova^a and A. A. Belousov^{a, #}

*^aKrasnoyarsk State Agrarian University
prosp. Mira 90, Krasnoyarsk 660049, Russia*

[#]E-mail: svoboda57130@mail.ru

The influence of dump and minimal agrochernozem processing technologies on the activity of nitrogen cycle enzymes and their role in the transformation of nitrogen-containing organic compounds was evaluated. The most significant differences in the seasonal dynamics of the fraction content of difficult-to-hydrolyze nitrogen compounds were found in the soil of the barley agrocenosis in all types of tillage. When using surface disking, the dynamics of their content was determined by the activity of protease. The high availability of the soil with easily hydrolyzable nitrogen was revealed, which indicated that there was no need for nitrogen fertilizers. The dependence of the dynamics of the content of easily hydrolyzable nitrogen compounds on the activity of protease was ambiguous. Under conditions of minimal tillage, the formation of easily hydrolyzable nitrogen compounds was inversely dependent on the proteolysis process. The plane-cutting method of loosening caused an increase in the level of urease activity relative to dump plowing and surface disking.

Key words: methods of tillage, nitrogen-containing organic compounds, enzymatic activity of the soil, protease, urease.

УДК 631.452:631.445.152:631.816:631.582:635.1/8.

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОДОРОДИЯ АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ЛУГОВОЙ ПОЧВЫ ПРИ РАЗНЫХ СИСТЕМАХ УДОБРЕНИЯ В ОВОЩНОМ СЕВООБОРОТЕ

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

¹Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства –
филиал Федерального научного центра овощеводства
140153 Московская обл., Раменский р-н, д. Верея, стр. 500, Россия

*E-mail: usp-olga@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.10.2022 г.

После доработки 22.11.2022 г.

Принята к публикации 15.12.2022 г.

В лабораторно-полевом опыте, проведенном в климатических условиях Московской обл., установлено, что после 2-х ротаций (6 лет) насыщенного овощного севооборота (капуста белокочанная поздняя—морковь—свекла столовая) на аллювиальной луговой среднесуглинистой почве при ежегодном внесении биокомпоста в дозе 6 т/га (суммарно 18 т/га) произошла стабилизация содержания гумуса в почве, отмечена тенденция к накоплению фракции щелочногидролизующего азота (+6%) и расходованию подвижных форм фосфора (–4%) и калия (–6%), а также разуплотнению почвы. Использование минеральных удобрений в одинарной и полуторной дозах выявило тенденцию к снижению содержания гумуса в почве (на 3–4%), гидролизующего азота (на 7–8%) и накоплению подвижных фосфора (на 1–15%) и калия (на 3–22%). Внесение половинной дозы минеральных удобрений привело к ухудшению почвенного плодородия, снижению содержания гумуса (–5%), подвижного фосфора и калия (на 5 и 17%). Чуть более эффективным было внесение ежегодно биокомпоста в дозе 3 т/га. При совместном внесении биокомпоста (6 т/га) и одинарной дозы NPK отмечена стабилизация содержания гумуса в почве на начальном уровне, накопление гидролизующего азота (на 9%), подвижного фосфора и калия (на 5–6%). За 2 ротации отмечено снижение содержания обменного кальция (на 1–10% от начального уровня) и магния (на 3–11%) и слабое подкисление почвы (снижение pH_{KCl} на 1–2% от начального показателя). Установлено, что средняя продуктивность пашни без применения удобрений составляла 50 т/га, при внесении половинной дозы повышалась на 14, одинарной – на 28, полуторной на –42%, применение биокомпоста в дозах 3 и 6 т/га обеспечивало рост продуктивности на 8–16%. При совместном ежегодном внесении биокомпоста с одинарной дозой NPK средняя продуктивность севооборота повышалась на 26–35%.

Ключевые слова: аллювиальная луговая почва, овощной севооборот, минеральные удобрения, органические удобрения, плодородие, гумус, азот, фосфор, калий, кальций, магний, кислотность

DOI: 10.31857/S0002188123030122, EDN: KOFONG

ВВЕДЕНИЕ

Основным условием стабильного развития агропромышленного комплекса России и источником расширения сельскохозяйственного производства является сохранение, воспроизводство и рациональное использование почвенного плодородия земель сельскохозяйственного назначения. Сохранение и воспроизводство плодородия почв является естественным условием интенсификации земледелия, способствует росту урожаев, увеличивает ценность пашни, имеет природоохранное значение. В последние годы результаты агрохимического обследования почв сельхозугодий выявили 2 основные тенденции в изменении почвенного плодородия [1]: медленное, но постоян-

ное снижение содержания гумуса, подвижных форм фосфора и калия, а также увеличение площади кислых почв, что является следствием недостаточного внесения органических и минеральных удобрений, известковых материалов. Овощные культуры требовательны к плодородию почвы, отличаются чувствительностью к реакции среды и высоким биологическим выносом из почвы [2, 3]. Минеральные и органические удобрения – главный ресурс управления продукционным процессом при применении интенсивных технологий. В литературе уделено мало внимания почвенному плодородию аллювиальных луговых среднесуглинистых почв в овощных севооборотах при разных системах удобрения, можно отметить работы Добровольского [4], Кораблевой [5].

Таблица 1. Количество питательных веществ, внесенное с удобрениями

Вариант	Внесено с удобрениями за 2 ротации, кг/га			Соотношение питательных веществ		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Без удобрений (контроль)	0	0	0		—	
0.5 NPK	390	220	640	1.77	1.0	2.91
NPK	780	440	1280	1.77	1.0	2.91
1.5 NPK	1170	660	1920	1.77	1.0	2.91
Биокомпост 3 т/га	540	360	360	1.50	1.0	1.00
Биокомпост 6 т/га	1080	720	720	1.50	1.0	1.00
0.5 NPK + биокомпост 3 т/га	930	580	1000	1.60	1.0	1.72
NPK + биокомпост 6 т/га	1860	1160	2000	1.60	1.0	1.72

На аллювиальной луговой почве Быковского расширения поймы р. Москвы (Раменский р-н) исследования ее плодородия проводили во ВНИИ овощеводства (ныне ВНИИО — филиал ФНЦО) [6–8]. Цель работы — изучение изменения основных агрохимических показателей плодородия аллювиальной луговой почвы в чисто овощном севообороте при разных системах удобрения с применением современных органических удобрений — биокомпостов на основе птичьего помета.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено во ВНИИО — филиале ФНЦО в лабораторно-полевом опыте на аллювиальной луговой среднесуглинистой почве поймы р. Москвы Раменского р-на Московской обл. в течение 2-х ротаций (6 лет) овощного севооборота.

Овощные культуры возделывали в интенсивном овощном севообороте с чередованием культур: капуста белокочанная поздняя—морковь—свекла столовая. Возделывание капусты и корнеплодов вели по принятым в хозяйстве технологиям. Густота посадки 40-суточной рассады капусты поздней — 35 тыс. шт./га, посева семян моркови — 1 млн шт./га, свеклы столовой — 0.5 млн шт./га.

Одинарные дозы минеральных удобрений составили: под капусту — N150P100K250, под морковь — N90P60K180, под свеклу — N150P60K210 (табл. 1). Минеральные удобрения в виде аммиачной селитры (34% N), двойного суперфосфата (42% P₂O₅) и хлористого калия (60% K₂O) и органические в виде биокомпоста с общим содержанием N — 3%, P₂O₅ и K₂O — по 2% вносили весной (2-я декада мая) взбросом, с последующей заделкой культиватором-гребнеобразователем.

Биокомпост в отличие от навоза имеет более низкую влажность (30–40%), высокое содержание основных питательных веществ (3:2:2%) и органического вещества (~30% в пересчете на углерод), не содержит семян сорных растений. Дозы его внесения на порядок меньше, чем при использовании традиционного навоза.

Пробы почвы для анализа отбирали весной (2-я декада мая), до внесения удобрений из пахотного слоя 0–20 см тростевым буром равномерно со всей площади делянки.

Полевые опыты проведены в соответствии с методикой [9]. Агрохимические исследования выполняли общепринятыми методами [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание гумуса — основной критерий плодородия почвы. В последние десятилетия, в связи с сокращением внесения органических удобрений, исключением сидеральных культур из севооборотов, наблюдают медленное снижение запасов гумуса в пахотных почвах. В отличие от минеральных удобрений, где пополнение гумуса в почве возможно лишь при увеличении массы пожнивных и корневых остатков вследствие увеличения урожайности культур севооборота, органические удобрения, в частности биокомпосты, содержат в своем составе до 30–40% (в пересчете на углерод) органического вещества и являются дополнительным поставщиком гумуса в почвы. В наших исследованиях (табл. 2) ежегодное внесение биокомпоста в дозе 6 т/га (в сумме 36 т за 2 ротации) позволило стабилизировать содержание гумуса в пахотном слое почвы на уровне 3.13%. Доза биокомпоста 3 т/га ежегодно (в сумме 18 т/га) обеспечила меньший эффект накопления и сохранения гумуса. Минеральные удобрения в разных дозах (половинная, полная, полуторная)

Таблица 2. Изменение содержания гумуса, гидролизуемого азота и подвижных фосфора и калия в почве (слой 0–20 см)

Вариант	Обнаружено в почве (слой 0–20 см) после 2-х ротаций (6 лет) овощного севооборота							
	гумус		N _{гидр}		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	г/100 г	%	мг/100 г	%	мг/100 г	%	мг/100 г	%
Исходное	3.12	100	9.8	100	25.9	100	12.5	100
Без удобрений (контроль)	2.94	94	8.5	87	23.7	92	9.8	78
0.5 NPK	2.95	95	8.8	90	24.5	95	10.4	83
NPK	3.03	97	9.0	92	26.2	101	12.9	103
1.5 NPK	3.00	96	9.1	93	29.8	115	15.2	122
Биокомпост 3 т/га	3.05	98	9.5	97	24.1	93	11.1	89
Биокомпост 6 т/га	3.13	100	10.4	106	24.9	96	11.8	94
0.5 NPK + биокомпост 3 т/га	3.01	96	9.4	96	24.5	95	11.6	93
NPK + биокомпост 6 т/га	3.11	100	10.7	109	27.1	105	13.2	106
HCP ₀₅	0.14	—	1.6	—	2.2	—	2.5	—

не были способны поддерживать уровень содержания гумуса в почве и лишь замедляли его минерализацию. При этом эффективность совместного внесения органических и минеральных удобрений была больше: в варианте с ежегодным внесением расчетной дозы NPK совместно с биокомпостом в дозе 6 т/га содержание гумуса в почве сохранилось на начальном уровне. Вероятно, при дальнейшем использовании биокомпоста можно будет наблюдать прирост запасов гумуса в почве. Выращивание овощей на полностью неудобренной почве (вариант без удобрений), а также с минимальным их количеством (вариант 1/2 NPK) в максимальной степени ускоряло минерализацию органического вещества почвы.

Содержание щелочегидролизуемого азота (по методу Корнфилда) в почве имело тенденцию к увеличению в вариантах с внесением биокомпоста 6 т/га ежегодно — до 9% от начального содержания в почве, что косвенно подтвердило накопление в почве органических веществ; при применении чисто минеральной системы удобрения — снижалось на 7–10%, в том числе и в варианте с полуторной дозой NPK. Для гидролизуемого азота были характерны те же закономерности зависимости от систем удобрения, что и для гумуса.

В Нечерноземной зоне капуста белокочанная потребляет для создания 10 т основной продукции 27 кг N, 7 кг P₂O₅ и 32 кг K₂O, морковь — 29, 13 и 44 кг, свекла столовая — 47, 18 и 69 кг соответ-

ственно [11]. Таким образом, общий вынос может достигать 300 кг N/га, 100 кг P₂O₅/га и 400 кг K₂O/га и более, что требует обязательного восполнения затрат.

Эффективное плодородие почв в отношении фосфора принято характеризовать запасом подвижных форм фосфора, т.е. фосфором почвенного раствора и переходящим в раствор под воздействием слабых кислот или щелочей. Аллювиальная луговая почва характеризуется высоким естественным содержанием подвижного фосфора (по методу Чирикова), поэтому даже после 6-летнего выращивания овощей без внесения удобрений класс почвы по обеспеченности остался на высоком уровне (>20 мг/100 г почвы). Полуторная доза NPK, вносимая ежегодно, обеспечивала накопление подвижного фосфора в почве больше на 15% к начальному содержанию, а расчетная доза стабилизировала содержание подвижного P₂O₅ (рис. 1). Применение биокомпоста в дозах 3 и 6 т/га ежегодно показало тенденцию к снижению P₂O₅ в почве, видимо, из-за недостатка фосфора в удобрении. Так же влияло и ежегодное использование половинной дозы NPK.

Для характеристики плодородия в отношении калия следует учитывать калий почвенного раствора (легкорастворимый) и обменный калий, а также частично необменный, извлекаемые из почвы разными растворителями. В нашем исследовании содержание подвижного калия (по мето-

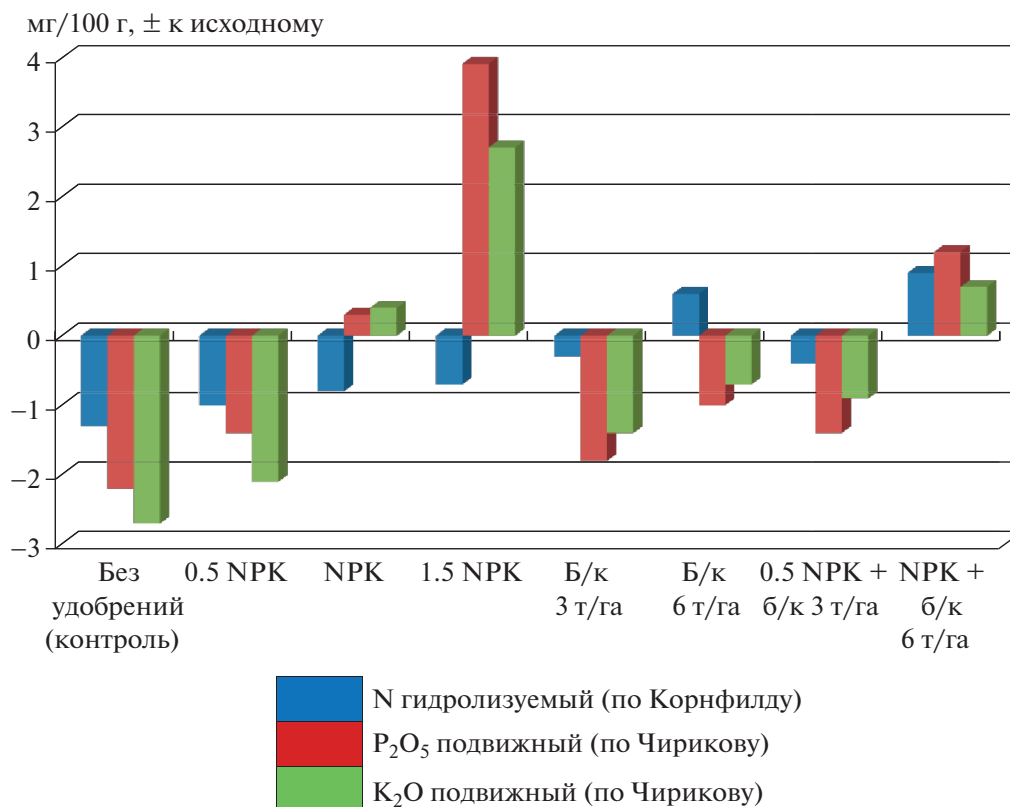


Рис. 1. Изменение содержания гидролизуемого азота, подвижных фосфора и калия в аллювиальной луговой почве после 2-х ротаций овощного севооборота. Б/к – биокомпост.

ду Чирикова, в 0.5 н. CH_3COOH) было более вариабельным в сравнении с фосфором в вариантах ввиду большего его поглощения овощными культурами, а также возможности его вымывания в нижележащие горизонты, переходом в необменную форму и т.п. Только в вариантах с внесением 1 1/2 NPK выявлено накопление подвижных форм калия (на 22%) в сравнении с начальным содержанием, расчетная доза NPK, а также ее внесение совместно с биокомпостом, позволила компенсировать вынос калия и поддержать его содержание на исходном (в год закладки) уровне. При использовании чисто органической системы удобрения в вариантах с биокомпостом почва потеряла 6–11% K_2O от начального уровня. Выращивание овощей в севообороте без использования удобрений, а также с половинной дозой NPK негативно отражалось на содержании подвижного калия, его убыль составила 17–22%.

Овощные культуры потребляют значительное количество кальция и магния. По данным Борисова [3], высоким потреблением кальция (CaO) отличаются поздняя капуста белокочанная и свекла столовая (49–50 кг/10 т), морковь – несколько меньшим (22 кг/10 т). Общий вынос уро-

жаем этого элемента может достигать 364, 221 и 132 кг/га соответственно. Вынос магния урожаем капусты поздней 80 т/га достигает 60 кг MgO /га, свеклы столовой (40 т/га) – 52 кг/га, моркови (60 т/га) – 48 кг MgO /га. По данным работы [12], потребление магния на 10 т урожая составляет: капусты белокочанной – 7, свеклы столовой – 20, моркови – 5 кг MgO .

Показано (табл. 3), что за 2 ротации (6 лет) овощного севооборота содержание в почве обменного кальция уменьшилось на 1–10, магния – на 3–11% от начального содержания из-за выноса этих элементов урожаем и полным отсутствием компенсации, т.к. примененные удобрения не содержали в своем составе этих макроэлементов. Параллельно наблюдали тенденцию к увеличению кислотности почвы. При регулярном внесении органических удобрений (биокомпоста) отмечена тенденция к разуплотнению почвы, уменьшению ее объемного веса.

При оценке любой системы удобрения важным является максимально возможная урожайность культуры (табл. 4, рис. 2). Минимальная средняя продуктивность севооборота получена в варианте без применения удобрений. В вариантах

Таблица 3. Изменение содержания обменных оснований и кислотности почвы после 2-х ротаций овощного севооборота

Вариант	Обнаружено в почве (слой 0–20 см) после 2-х ротаций (6 лет) овощного севооборота							
	Ca ²⁺		Mg ²⁺		pH _{KCl}		плотность	
	мг-экв/100 г	%	мг-экв/100 г	%	ед. pH	%	г/см ³	%
Исходное	18.0	100	3.5	100	6.32	100	1.13	100
Без удобрений (контроль)	17.8	99	3.4	97	6.26	99	1.13	100
0.5 NPK	16.5	92	3.2	91	6.22	98	1.13	100
NPK	16.9	94	3.3	94	6.22	98	1.13	100
1.5 NPK	16.2	90	3.1	89	6.17	98	1.14	101
Биокомпост 3 т/га	17.3	96	3.3	94	6.21	98	1.11	98
Биокомпост 6 т/га	17.5	97	3.3	94	6.24	99	1.10	97
0.5 NPK + биокомпост 3 т/га	17.3	96	3.2	91	6.23	99	1.12	99
NPK + биокомпост 6 т/га	17.0	94	3.1	89	6.20	98	1.11	98
HCP ₀₅	1.2	—	0.6	—	0.07	—	0.04	—

Таблица 4. Урожайность овощного севооборота (среднее за 2 ротации)

Вариант	Средняя урожайность овощного севооборота (стандартной продукции)							
	капуста белокочанная поздняя		морковь		свекла столовая		средняя продуктивность	
	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%
Без удобрений (контроль)	47.3	100	53.2	100	49.7	100	50.1	100
0.5 NPK	56.8	120	60.4	114	54.2	109	57.1	114
NPK	66.8	141	64.8	122	60.2	121	63.9	128
1.5 NPK	79.5	168	66.6	125	66.8	134	71.0	142
Биокомпост 3 т/га	55.2	117	54.9	103	52.3	105	54.1	108
Биокомпост 6 т/га	58.3	123	57.9	109	57.9	116	58.0	116
0.5 NPK + биокомпост 3 т/га	66.8	141	62.4	117	60.1	121	63.1	126
NPK + биокомпост 6 т/га	71.5	151	67.9	128	63.5	128	67.6	135
HCP ₀₅	3.4	—	3.7	—	4.8	—	3.4–4.8	—

с чисто органической системой удобрения отмечено повышение урожайности на 8–16%, а в вариантах с чисто минеральной (1/2 NPK, NPK, 1 1/2 NPK) – на 14–42%. Органо-минеральная система удобрения обеспечила 26–35% прироста продуктивности севооборота.

ВЫВОДЫ

1. После 2-х ротаций (6 лет) овощного севооборота на аллювиальной луговой почве содержание

гумуса и гидролизуемого азота сохранилось на близком к начальному уровню (3.11–3.13% и 10.4–10.7 мг/100 г) при ежегодном внесении биокомпоста в дозе 6 т/га, отдельно или совместно с NPK. Минимальное содержание гумуса (2.84–2.85%) и гидролизуемого азота (8.5–8.8 мг/100 г) выявлено в контроле, минеральные удобрения сдерживали минерализацию гумуса почвы.

2. В почве возросло содержание подвижного фосфора (на 1–15%) и калия (на 3–22%) в вари-

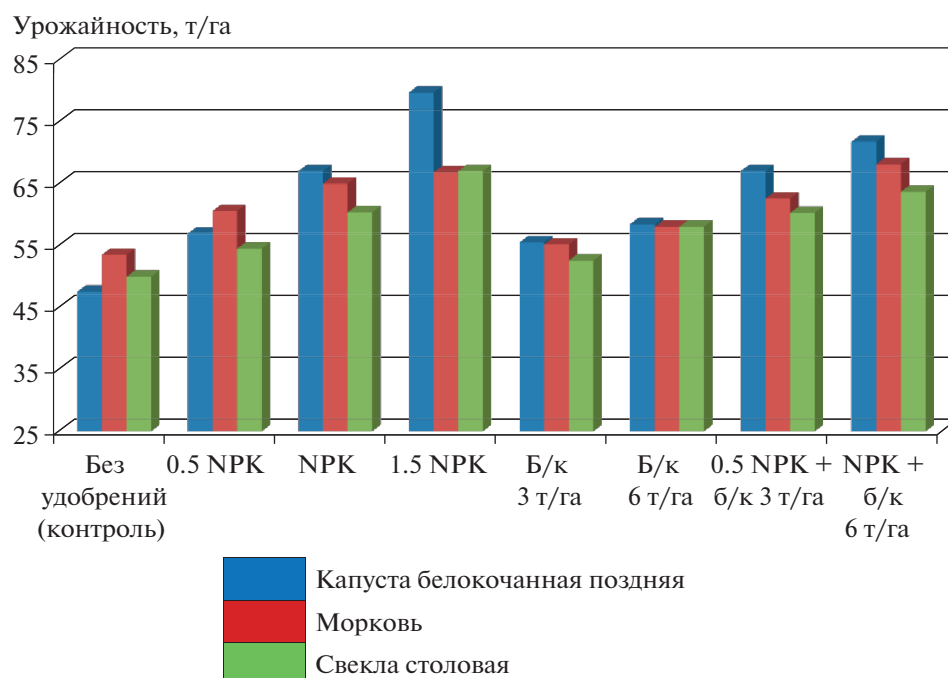


Рис. 2. Урожайность овощных культур в севообороте (2016–2021 гг., стандартная продукция). Б/к – биокомпост.

антах с внесением NPK, 1 1/2 NPK и NPK совместно с биокомпостом 6 т/га. Половинная доза 1/2 NPK, а также внесение только биокомпоста уменьшили содержание подвижного фосфора (на 4–7%) и калия (на 6–17%) в почве.

3. Количество обменных оснований Ca^{2+} и Mg^{2+} имело тенденцию к снижению на 1–11% в зависимости от системы удобрения; отмечено подкисление почвы и тенденция к снижению плотности почвы при использовании ежегодно биокомпоста в дозе 6 т/га.

4. Чисто органическая система удобрения (биокомпост) обеспечила рост урожайности овощей в среднем на 8–16, минеральная система (1/2 NPK, NPK, 1 1/2 NPK) – на 14–42, органо-минеральная – на 26–35%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев В.Г., Ефремов Е.Н., Завалин А.А., Романенков В.А., Шафран С.А., Аристархов А.Н., Шильников И.А. Прогноз потребности и платежеспособного спроса сельского хозяйства Российской Федерации на минеральные удобрения до 2020 года. М.: ВНИИА, 2011. 52 с.
2. Журбицкий З.И. Физиологические и агрохимические основы применения удобрений. М.: АН СССР, 1963. 293 с.
3. Борисов В.А. Система удобрения овощных культур. М.: Росинформагротех, 2016. 392 с.
4. Добровольский Г.В. Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: Изд-во МГУ, 1968. 295 с.
5. Кораблева Л.И. Плодородие, агрохимические свойства и удобрение пойменных почв Нечерноземной зоны. М.: Наука, 1969. 278 с.
6. Борисов В.А., Васючков И.Ю., Успенская О.Н. Калийный режим аллювиальной луговой почвы поймы р. Москвы при длительном применении удобрений в овощекормовом севообороте // Агрохимия. 2013. № 2. С. 11–14.
7. Борисов В.А., Васючков И.Ю., Успенская О.Н. Азотный режим аллювиальной луговой почвы поймы р. Москвы а при длительном применении удобрений в овощекормовом севообороте // Агрохимия. 2014. № 9. С. 8–12.
8. Борисов В.А., Васючков И.Ю., Успенская О.Н., Гренадеров Н.В. Фосфатный режим аллювиальной луговой почвы после 30-летнего применения минеральных удобрений в овощекормовом севообороте // Агрохимия. 2014. № 1. С. 23–26.
9. Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. М.: Россельхозакадемия, 2011. 649 с.
10. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 625 с.
11. Державин Л.М., Попова Р.Н., Дегтярова Н.И. Нормативы выноса элементов питания сельскохозяйственными культурами. М.: МСХА, 1991. 66 с.
12. Круг Г. Овощеводство. Пер. с нем. В.И. Леунова. М.: Колос, 2000. 576 с.

Changes in Fertility of Alluvial Meadow Soil under Different Fertilizer Systems in Vegetable Crop Rotation

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

^a*All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – Branch of FNTSO
d. Vereya 500, Moscow region, Ramensky district 140153, Russia*

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

In a laboratory and field experiment conducted in the climatic conditions of the Moscow region, it was found that after 2 rotations (6 years) saturated vegetable crop rotation (late white cabbage – carrots – table beets) on alluvial meadow medium loamy soil with annual application of biocompost at a dose of 6 t/ha (total of 18 t/ha), the humus content in the soil stabilized, a tendency to accumulation of alkaline hydrolyzable nitrogen fraction (+6%) was noted and the consumption of mobile forms of phosphorus (–4%) and potassium (–6%), as well as soil decompression. The use of mineral fertilizers in single and one-and-a-half doses revealed a tendency to decrease the content of humus in the soil (by 3–4%), hydrolyzable nitrogen (by 7–8%) and the accumulation of mobile phosphorus (by 1–15%) and potassium (by 3–22%). The introduction of a low dose of mineral fertilizers led to a deterioration of soil fertility, a decrease in the content of humus (–5%), mobile phosphorus and potassium (by 5 and 17%). Slightly more effective was the introduction of biocompost annually at a dose of 3 t/ha. With the joint application of biocompost (6 t/ha) and a single dose of NPK, stabilization of the humus content in the soil at the initial level, accumulation of hydrolyzable nitrogen (by 9%), mobile phosphorus and potassium (by 5–6%) was noted. During 2 rotations, there was a decrease in the content of exchangeable calcium (by 1–10% from the initial level) and magnesium (by 3–11%) and weak acidification of the soil (a decrease in pH_{KCl} by 1–2% from the initial indicator). It was found that the average productivity of arable land without the use of fertilizers was 50 t/ha, increased by 14 when the half dose was applied, by 28 when the single dose was applied, and by 42% when the half dose was applied, the use of biocompost at doses of 3 and 6 t/ha provided an increase in productivity by 8–16%. With the joint annual application of biocompost with a single dose of NPK, the average productivity of crop rotation increased by 26–35%.

Key words: alluvial meadow soil, vegetable crop rotation, mineral fertilizers, organic fertilizers, fertility, humus, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, acidity.

УДК 631.81;581.13;581.14;633.14“324”

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ДИНАМИКУ НАКОПЛЕНИЯ БИОМАССЫ И РОСТА РАСТЕНИЙ ОЗИМОЙ РЖИ

© 2023 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}, К. Ф. Шаврина²¹Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия²Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

После доработки 10.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Динамику накопления биомассы и высоты растений озимой ржи (*Secale cereale* L.) изучали в условиях многолетнего стационарного полевого эксперимента (2022 г.), заложенного на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (1982 г.). Систематическое внесение минеральных удобрений (вариант 2 – N65P50K50, вариант 3 – N100P75K75) оказало существенное влияние на высоту и биомассу растений на всех этапах вегетации (8 временных точек в течение 50-ти сут). Для описания динамики биомассы и высоты растений *Secale cereale* L. хорошо подошли сигмоидная (логистическая) и линейная модели, которые позволили вычислить такие параметры, как максимальные биомасса и высота (M_2 , г : H_2 , см), максимальные скорости ($V_{\max}$, г · сут⁻¹ (см · сут⁻¹)) и средние скорости (b , г · сут⁻¹ (см · сут⁻¹)). Величины $V_{\max}$ нарастания сырой биомассы растений в вариантах 2 и 3 превысило данный показатель для контрольного варианта в 1.7–2.0 раза, $V_{\max}$ нарастания высоты растений варьировалась в пределах 4.2–4.6 см · сут⁻¹, не зависела от внесения минеральных удобрений. Внесение минеральных удобрений привело к увеличению средней скорости нарастания биомассы растений озимой ржи (b , г · сут⁻¹) по отношению к контролю, более чем в 2 раза.

Ключевые слова: динамика биомассы и высоты растений, озимая рожь, минеральные удобрения, логистическая модель, линейная модель, параметры модели.

DOI: 10.31857/S0002188123050101, EDN: USLXKS

ВВЕДЕНИЕ

Рост любых организмов является сложным и многоступенчатым процессом, включающим тысячи биохимических реакций, при моделировании вклад каждой реакции учесть не представляется возможным, поэтому в теоретических и практических исследованиях ограничиваются лишь небольшим числом параметров, которые наиболее полно характеризуют моделируемый объект или явление [1]. Закономерности роста растений изучают на разных уровнях: органов, тканей, отдельных процессов (от микроводорослей до древесной растительности) [1–9], применяя различные подходы, методы и модели, в зависимости от цели исследования. Рост – один из важнейших показателей состояния растительного организма. Учет показателей роста наиболее полно раскрывает морфогенез организма как процесс возникновения его формы, морфологического статуса на любой момент времени и положения в ценопопуляции [10].

Для описания процессов, проходящих в агроценозе в основном используют 3 основные модели: линейную, экспоненциальную и сигмоидную (логистическую). Это дает возможность вычислить такие параметры, как скорость, максимальная скорость, период $T_{1/2}$ (периоды полуудвоения массы, полураспада вещества и т.п.). Одно из основных условий проведения экспериментов такого рода – не менее 6-ти временных точек (наблюдений) [7, 11]. Выявленные закономерности динамики роста растительного организма в зависимости от различных факторов могут послужить основой для управления продукционным процессом [8].

Цель работы – в условиях многолетнего полевого эксперимента установить параметры эмпирических моделей, характеризующих влияние различных доз минеральных удобрений на динамику накопления биомассы и высоты растений озимой ржи.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика почвы опыта

Вариант	рН _{KCl}	C _{орг} , %	Подвижные соединения, мг/кг		
			N _{легкогидр}	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Контроль без удобрений)	4.5 ± 0.2	3.0 ± 0.3	93 ± 8	208 ± 24	90 ± 10
2. N65P50K50	4.5 ± 0.2	3.4 ± 0.5	107 ± 23	266 ± 51	98 ± 20
3. N100P75K75	4.7 ± 0.2	3.8 ± 0.3	110 ± 14	268 ± 15	88 ± 5

Нумерация вариантов та же на рис. 2, 3.

Таблица 2. Динамика накопления биомассы растений озимой ржи в зависимости от дозы минеральных удобрений, г/35 растений (начало выхода в трубку—колошение)

Время, сут	Масса сырая			Масса воздушно-сухая		
	1	2	3	1	2	3
1	33.0 ± 0.9	38 ± 5	38 ± 6	7.0 ± 0.6	7.6 ± 0.9	7.9 ± 1.3
8	47.8 ± 0.4	65 ± 4	75 ± 2	10.7 ± 0.4	12.6 ± 0.7	13.5 ± 0.4
15	72 ± 4	116 ± 8	150 ± 11	16.6 ± 0.8	23.3 ± 1.3	29 ± 1
21	105 ± 6	158 ± 1.0	200 ± 32	22 ± 1	29 ± 0.6	36 ± 6
29	157 ± 7	272 ± 22	324 ± 39	35 ± 4	52 ± 4	59 ± 6
36	223 ± 23	365 ± 37	454 ± 83	58 ± 5	84 ± 8	101 ± 16
43	227 ± 31	449 ± 64	468 ± 34	69 ± 10	127 ± 15	125 ± 11
50	168 ± 4	397 ± 45	402 ± 67	71 ± 2	163 ± 18	163 ± 26

Примечание. В графе 1 — контроль без удобрений, 2 — N65P50K50, 3 — N100P75K75.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние различных доз минеральных удобрений на динамику биомассы растений озимой ржи (*Secale cereale* L.) изучали в условиях многолетнего стационарного полевого эксперимента в течение вегетационного периода 2022 г.

Агроэкологический стационар был заложен в Меньковском филиале Агрофизического института (1982 г., Ленинградская обл., Гатчинский р-н). Опыт представляет собой 7-польный зернотравянопропашной севооборот с традиционным для Северо-Западного региона набором и чередованием культур: сидеральный пар — рожь озимая — ячмень + многолетние травы — многолетние травы 1-го и 2-го годов пользования — картофель — рапс яровой. Общая площадь севооборота — 4.2 га, одного поля — 0.6 га. В пределах каждого поля было заложено 3 варианта основного удобрения: 1 — контроль без удобрений, 2 — N65P50K50, 3 — N100P75K75, формируемых ежегодным предпосевным внесением минеральных удобрений (смесь аммиачной селитры и аммофоски = 1 : 3) [12]. Площадь варианта (делянки) — 30 × 62 м = 1860 м². Почва — дерново-слабоподзолистая, легкосуглинистая, мощность пахотного слоя 23 см (табл. 1).

Посев озимой ржи сорта Славия (сорт включен в Госреестр в Северо-Западном регионе, рекомендован для возделывания в Ленинградской обл.) проводили 9 сентября 2021 г. Всходы были зафиксированы через 10 сут после посева. Минеральные удобрения были внесены 30 апреля 2022 г.

Для отбора почвенных и растительных проб в каждом варианте в пределах тестируемого поля был выделен участок 1 × 62 м. Растительные пробы отбирали в каждом варианте в 3-кратной повторности — 8 отборов за вегетацию (12 мая—30 июня, периодичность отражена в табл. 2). Определяли сырую, воздушно-сухую биомассу и высоту растений. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растительные пробы отбирали в период начала выхода в трубку—колошения в течение 50-ти сут (табл. 2). Количество растений в смешанной пробе изменяли по мере увеличения биомассы — от 80-ти (1-й отбор) до 16-ти шт. (8-й отбор). При обработке результатов, характеризующих динамику биомассы, количество растений в пробах во всех отборах было приведено к единому показателю — 35 шт.



Рис. 1. Стационарный полевой эксперимент, озимая рожь.

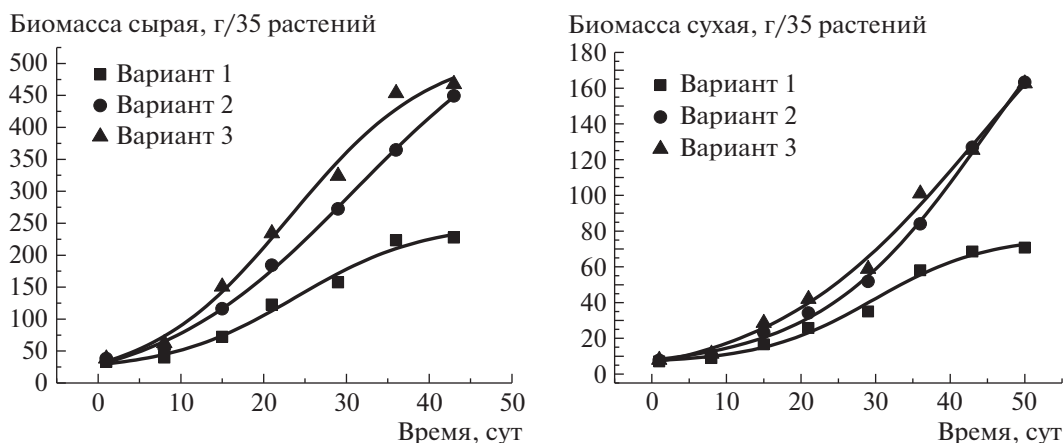


Рис. 2. Влияние различных доз минеральных удобрений на динамику накопления биомассы растений озимой ржи (сырая биомасса 1–42 сут, воздушно-сухая биомасса 1–50 сут).

Установлено, что систематическое внесение минеральных удобрений существенно влияло на высоту и биомассу растений на всех тестируемых этапах роста растений. Наиболее существенные различия наблюдали по отношению контролю: сырая и воздушно-сухая биомасса растений на 50-е сут наблюдения (колошение) возросла при внесении минеральных удобрений в дозах N65P50K50 (вариант 2) и N100P75K75 (вариант 3) на 137–139 и 130% соответственно. На рис. 1 четко прослежена граница между вариантами 1 и 2 (по интенсивности окрашивания посева).

На 50-е сут наблюдали снижение сырой биомассы растений. Известно [13], что рост не всегда сопровождается увеличением размера и массы растения. Например, в процессе прорастания семена теряют до 50% сухого вещества; у злаков в

период формирования генеративных органов масса сухого вещества не только не увеличивается, но иногда даже снижается. Скорость роста различна у различных органов, зависит от вида растения, регулируется внешними и внутренними факторами.

Динамика накопления биомассы и высоты растений озимой ржи может быть аппроксимирована сигмоидной (логистической) и линейной моделями. Логистическая модель позволяет установить такие показатели динамики роста растений как максимальная биомасса или высота и максимальная скорость нарастания биомассы или высоты. Для описания динамики накопления биомассы растений данная модель имеет вид (рис. 2):

$$M = \frac{M_1 - M_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + M_2, \quad (1)$$

Таблица 3. Параметры модели (1), характеризующие динамику накопления биомассы растений озимой ржи

Вариант	Параметры модели					
	r^2	M_1 , г/35 шт.	M_2 , г/35 шт.	t_0 , сут	dt	$V_{\max}$, г · сут ⁻¹
Биомасса сырая (1–42 сут)						
1. Контроль	0.985	33	227	24 ± 0.9	5.7 ± 0.7	9.0
2. N65P50K50	0.989	38	449	26.5 ± 0.7	6.6 ± 0.6	15.6
3. N100P75K75	0.984	38	468	23.3 ± 0.9	6.1 ± 0.8	17.6
Биомасса воздушно-сухая (1–50 сут)						
1. Контроль	0.988	7	71	28.7 ± 0.8	6.0 ± 0.7	2.7
2. N65P50K50	0.984	7.6	163	34.9 ± 0.8	6.5 ± 0.8	6.0
3. N100P75K75	0.984	7.9	163	33 ± 0.9	7.4 ± 0.8	5.0

где M_1 — начальная биомасса, г, (равна нулю); M_2 — максимальная биомасса, г; t_0 — точка перегиба, в момент которой $M = 1/2 (M_1 + M_2)$; dt — крутизна кривой (угол наклона) — постоянная величина для данной кривой. Скорость прироста биомассы (г/сут) достигает максимума в момент, когда $t = t_0$. Отношение $(M_2 - M_1) : 4dt$ характеризует скорость на момент времени t_0 (максимальную, $V_{\max}$), г · сут⁻¹. Параметры модели представлены в табл. 3.

Параметры модели количественно характеризуют влияние минеральных удобрений на динамику накопления биомассы растений озимой ржи. Установлено, что максимальная биомасса (M_2) в вариантах 2 и 3 превысила данный показатель в контрольном варианте опыта в 2.0–2.1 раза (сырая) и в 2.3 раза (воздушно-сухая). Следует отметить, что существенные различия между вариантами 2 и 3 наблюдали на 8–36-е и 50-е сут наблюдений (табл. 1), что отразилось на показате-

лях $V_{\max}$: в вариантах 2 и 3 максимальная скорость нарастания сырой биомассы составила 15.6 и 17.6 г сут⁻¹ соответственно, что превысило данный показатель в контрольном варианте в 1.7 и 2.0 раза соответственно (табл. 3). Полученные показатели $V_{\max}$ по порядку величин согласуются с показателями максимальной скорости нарастания биомассы растений ячменя, установленными нами ранее [8].

Линейная модель позволила установить среднюю скорость нарастания биомассы растений за тестируемый период вегетации (данные табл. 1):

$$M(t) = M_0 + bt, \quad (2)$$

где $M(t)$ — биомасса растений (г) на момент времени t ; M_0 — биомасса растений (г) на момент первого отбора; b — скорость увеличения биомассы, г · сут⁻¹. Параметры модели представлены в табл. 4.

Коэффициенты корреляции (r), характеризующие динамику нарастания биомассы, варьировались в пределах 0.901–0.974, при критическом значении r на 5%-ном уровне значимости, равном 0.707. Выявлено, что внесение минеральных удобрений привело к увеличению средней скорости прироста биомассы растений озимой ржи по отношению к контролю, более чем в 2 раза. Величина b (г · сут⁻¹) в опыте варьировалась в пределах 4.0–9.4 (сырая биомасса) и 1.5–3.2 (воздушно-сухая биомасса). Следует отметить, что увеличение дозы минеральных удобрений на 50% (вариант 3 по отношению к варианту 2) не оказало существенного влияния на такие показатели как максимальная биомасса (табл. 3), средняя скорость нарастания биомассы (табл. 4), биомасса в фазе колошения (табл. 2).

Динамика высоты растений озимой ржи в период наблюдения также хорошо аппроксимиро-

Таблица 4. Параметры линейной модели, характеризующие динамику накопления биомассы растений озимой ржи (начало выхода в трубку–колошение)

Вариант	N	r	b , г · сут ⁻¹
биомасса сырая			
1. Контроль	8	0.901	4.0 ± 0.8
2. N65P50K50	8	0.970	9.0 ± 0.9
3. N100P75K75	8	0.948	9.4 ± 1.3
биомасса воздушно-сухая			
1. Контроль	8	0.974	1.5 ± 0.1
2. N65P50K50	8	0.952	3.2 ± 0.4
3. N100P75K75	8	0.969	3.2 ± 0.3

Примечание. Критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна 0.707. То же в табл. 6.

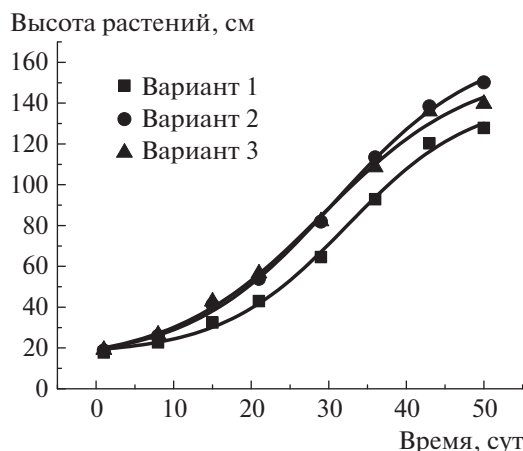


Рис. 3. Влияние различных доз минеральных удобрений на динамику высоты растений озимой ржи (начало выхода в трубку—колошение).

валась сигмоидной (логистической) функцией (рис. 3):

$$H(t) = \frac{H_1 - H_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + H_2 \quad (3)$$

где H_1 — начальная высота, см (равна нулю); H_2 — максимальная высота растений, см; t_0 — точка перегиба, в момент которой $H = 1/2(H_1 + H_2)$; dt — крутизна кривой (угол наклона) — постоянная величина для данной кривой. Скорость роста в высоту (см/сут) достигала максимума в момент $t = t_0$. Отношение $(H_2 - H_1)/4dt$ характеризовало скорость на момент времени t_0 (максимальную, $V_{\max}$), см/сут. Параметры модели представлены в табл. 5.

Наблюдали тенденцию к увеличению максимальной высоты растений озимой ржи (M_2) в вариантах 2 и 3 по отношению к контролю. Скорость роста растений в высоту ($V_{\max}$) варьировалась в пределах 4.2–4.6 см · сут^{−1}, внесение минеральных удобрений не оказало существенного влияния на данный показатель.

Среднюю скорость нарастания высоты растений устанавливали по линейной модели:

$$H(t) = H_0 + bt, \quad (4)$$

где $H(t)$ — высота растений (см) на момент времени t ; H_0 — высота растений (см), на момент первого отбора; b — скорость увеличения высоты, см · сут^{−1}. Параметры модели представлены в табл. 6.

Выявлено, что внесение минеральных удобрений привело к достоверному увеличению средней скорости роста растений озимой ржи в высоту на 12–20% по отношению к контролю.

Временную и пространственную неоднородность высоты растений озимой ржи в течение вегетации характеризовали вариационно-статистические показатели, представленные в табл. 7. Величины коэффициентов вариации (v) изменялись в пределах 6–18%, что позволило рассматривать высоту растений в пределах вариантов опыта как однородную [14].

ВЫВОДЫ

1. Для эффективного управления продукционным процессом сельскохозяйственных культур необходимо владеть знаниями о закономерностях роста и развития растений в изменяющихся почвенно-климатических условиях. Для выявления этих закономерностей необходима информация о динамике указанных процессов, т.е. нужно установление зависимостей “время—ответ”.

2. Для описания динамики биомассы и высоты культурных растений в течение вегетации хорошо подходят сигмоидная (логистическая) и линейная модели, которые позволяют вычислить такие параметры, как максимальная биомасса и высота (M_2 , г и H_2 , см), максимальная скорость ($V_{\max}$, г · сут^{−1} (см · сут^{−1})) и средняя скорость (b , г · сут^{−1} (см · сут^{−1})). В условиях многолетнего стационарного полевого эксперимента установлены параметры указанных моделей, характеризующие влияние систематического внесения минеральных удобрений на динамику накопления биомассы и высоты растений озимой ржи (период начала выхода в трубку—колошение).

3. Установлено, что максимальная скорость ($V_{\max}$) нарастания биомассы растений озимой ржи

Таблица 5. Параметры логистической модели (3), характеризующие динамику высоты растений озимой ржи

Вариант	Параметры модели					
	r^2	M_1 , см	M_2 , см	t_0 , сут	dt	$V_{\max}$, см · сут ^{−1}
1. Контроль	0.991	17.8	128	30 ± 0.7	6.6 ± 0.6	4.2
2. N65P50K50	0.994	18.7	150	28.6 ± 0.6	7.2 ± 0.5	4.6
3. N100P75K75	0.989	19.1	140	27.2 ± 0.8	7.2 ± 0.7	4.2

Таблица 6. Параметры линейной модели, характеризующие динамику высоты растений озимой ржи (начало выхода в трубку—колошение)

Вариант	N	r	b , см сут ⁻¹
1. Контроль	8	0.975	2.4 ± 0.2
2. N65P50K50	8	0.985	2.9 ± 0.2
3. N100P75K75	8	0.987	2.7 ± 0.2

Таблица 7. Вариационно-статистические показатели, характеризующие неоднородность динамики высоты растений озимой ржи

Вариант	N	M	$\pm\delta$	min	max	v , %
1-й замер						
1. Контроль	50	18	2	13	22	11
2. N65P50K50	50	19	2	14	23	10
3. N100P75K75	50	19	2	15	25	10
2-й замер						
1. Контроль	75	23	3	17	29	13
2. N65P50K50	75	26	3	19	36	12
3. N100P75K75	75	26	4	17	36	15
3-й замер						
1. Контроль	75	32	3	26	41	9
2. N65P50K50	75	41	5	29	52	12
3. N100P75K75	75	43	6	29	56	14
4-й замер						
1. Контроль	75	43	6	33	57	14
2. N65P50K50	75	54	8	40	83	15
3. N100P75K75	75	56	10	33	86	18
5-й замер						
1. Контроль	60	64	9	44	85	14
2. N65P50K50	60	82	10	55	100	12
3. N100P75K75	60	82	10	62	102	12
6-й замер						
1. Контроль	48	93	12	66	113	13
2. N65P50K50	48	113	11	85	140	10
3. N100P75K75	48	108	11	80	128	10
7-й замер						
1. Контроль	48	120	14	72	147	12
2. N65P50K50	48	138	10	119	166	7
3. N100P75K75	48	136	11	109	166	8
8-й замер						
1. Контроль	48	128	14	81	152	11
2. N65P50K50	48	150	14	114	177	9
3. N100P75K75	48	140	9	119	161	6

в вариантах с минеральными удобрениями (вариант 2 — N65P50K50, вариант 3 — N100P75K75) составила 15.6 и 17.6 (сырая) и 5.0 и 6.0 г · сут⁻¹ (воздушно-сухая) соответственно, что превысило данный показатель для контрольного варианта в 1.7 и 2.0 раза соответственно. Максимальная скорость увеличения высоты растений варьировалась в пределах 4.2–4.6 см · сут⁻¹, существенно не зависела от внесения минеральных удобрений.

4. Внесение минеральных удобрений привело к увеличению средней скорости нарастания биомассы растений озимой ржи (b , г · сут⁻¹) по отношению к контролю, более чем в 2 раза, средней скорости увеличения высоты (b , см · сут⁻¹) — на 12–20%.

5. Увеличение дозы минеральных удобрений на 50% (вариант 3 по отношению к варианту 2) не оказало существенного влияния на такие показатели как максимальные биомасса и высота, средняя скорость нарастания биомассы, максимальная скорость увеличения высоты, биомасса в фазе колошения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тренкешу Р.П., Лелеков А.С. Моделирование роста микроводорослей в культуре. Белгород: ООО «КОНСТАНТА», 2017. 152 с.
2. Абакумов А.И., Пак С.Я. Динамика биомассы фитопланктона в зависимости от минерального питания (математические модели) // Моделирование систем. 2010. № 3 (25). С. 10–19.
3. Лысенко С.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах // Исслед-е Земли из космоса. 2019. № 4. С. 48–59.
4. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесобразующих пород Урала // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 1 (80). С. 4–14.
5. Лелеков А.С. Моделирование роста и биосинтеза морских микроводорослей в квазинепрерывной культуре: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Севастополь, 2009. 24 с.
6. Courneade P.H. Dynamic system of plant growth. Mathematics. Universite montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc, 2009. 77 s.
7. Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В. Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // Докл. РАСХН. 2014. № 1. С. 50–53.
8. Витковская С.Е. Закономерности формирования биомассы и элементного состава растений ячменя в полевом опыте // Агрохимия. 2015. № 1. С. 63–72.
9. Courneade P.H., De Reffye P. A generalized poisson model to estimate inter-plant competition for light // Plant growth modeling, simulation, visualization and

- their applications / Ed. T. Fourcaud, X. Zhang. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, 2007. <https://doi.org/10.1109/PMA.2006.37>
10. Методы изучения ценопопуляций цветковых растений: учеб.-метод. пособ. для магистров биол. фак-та / Сост. А.С. Кашин, Т.А. Крицкая, Н.А. Петрова, И.В. Шилова. Саратов, 2015. 127 с.
 11. Витковская С.Е. Методы оценки пространственной и временной неоднородности биомассы и элементного состава сельскохозяйственных культур. СПб.: АФИ, 2019. 92 с.
 12. Шпанев А.М. Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // Совр. пробл. ДЗЗ из космоса. 2019. Т. 16 (3). С. 61–68.
 13. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2006. 743 с.
 14. Витковская С.Е. Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов. СПб.: АФИ, 2011. 52 с.

Influence of Mineral Fertilizers on the Dynamics of Biomass Accumulation and Plant Growth of Winter Rye

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#} and K. F. Shavrina^b

^aRussian State Hydrometeorological University
Voronezhskaya ul. 79, Saint-Petersburg 192007, Russia

^bAgrophysics Research Institute
Gragdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

[#]E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

The dynamics of biomass and height of *Secale cereale* L. plants was studied in a long-term stationary field experiment on sod-podzolic light loamy soil. Systematic application of mineral fertilizers (option 2 – N65P50K50, option 3 – N100P75K75) had a significant impact on the height and biomass of plants at all tested stages of vegetation (eight time points within 50 days). To describe the dynamics of biomass and height of *Secale cereale* L. plants, sigmoid (logistic) and linear models are well suited, which made it possible to calculate such parameters as maximum biomass and height (M_2 , g : H_2 , cm), maximum speed ($V_{\max}$, g · day⁻¹ (cm · day⁻¹)) and average speed (b , g · day⁻¹ (cm · day⁻¹)). The $V_{\max}$ values of the growth of raw plant biomass in variants 2 and 3 exceeded this indicator for the control variant by 1.7–2.0 times; $V_{\max}$ of plant height growth varied within 4.2–4.6 cm · day⁻¹, did not depend on the application of mineral fertilizers. The application of mineral fertilizers led to an increase in the average growth rate of the biomass of plants *Secale cereale* L. (b , g · day⁻¹), in relation to the control, by more than 2 times.

Key words: plant height and biomass dynamics, winter rye, mineral fertilizers, logistic model, linear model, model parameters.

УДК 631.85:631.559(571.11)

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФОСФОРНОГО УДОБРЕНИЯ НА ВАРЬИРОВАНИЕ ПРИБАВОК УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ЗАУРАЛЬЯ¹

© 2023 г. О. В. Волюнкина

*Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия**E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru*

Поступила в редакцию 21.12.2022 г.

После доработки 18.01.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Показана изменчивость прироста урожайности культур от применения фосфорного удобрения в дозах P_{40-20} , добавленных к азотному удобрению в 52-летнем стационарном опыте Курганского НИИСХ. Изучение эффективности фосфора вели сначала в зернопропашном севообороте при ежегодной вспашке, затем в посевах бессменной пшеницы после стерневого фона. По годам прибавки урожайности очень отличались. За небольшими исключениями показана связь величины прироста урожайности от фосфора с температурой воздуха 1-й декады июня. Высоким прибавкам сопутствовала пониженная температура воздуха в 1-й декаде июня и достаточная обеспеченность растений влагой. Связь с осадками ярче проявилась в посевах бессменной пшеницы. Окупаемость дозы P_{40} приростом урожая в зерновых единицах в севообороте в годы с высокой эффективностью удобрения была на уровне 8–14 кг/кг, опускаясь в других условиях до 6–1.5 кг/кг. Оплата P_{20} прибавками зерна бессменной пшеницы менялась от 13–17–26 кг/кг в годы с высокими и средними прибавками до 2 кг/кг при низких эффектах от применения фосфорного удобрения.

Ключевые слова: зернопропашной севооборот, бессменная пшеница после стерни, прибавки от фосфорного удобрения на фоне применения азота, погодные условия.

DOI: 10.31857/S0002188123050113, **EDN:** USOTPV

ВВЕДЕНИЕ

Показано, что запасы фосфора в пахотном слое почв России невелики – порядка 2.3–4.4 т P_2O_5 /га. Две трети запаса приходится на минеральные формы разной степени доступности для растений. В Российской Федерации на 01.01.2019 насчитывалось 26% почв пашни с очень низким и низким содержанием подвижного P_2O_5 , средним – 34% и с повышенным, высоким и очень высоким – 40%. Однако доля поступления аммофоса от общего объема применяемых удобрений в части округов невысо-

кая: Дальневосточный и Уральский – 3.4, Сибирский – 7.2, Приволжский – 9.1% [1].

Малое использование фосфорных удобрений в земледелии части регионов привело к снижению содержания в почве подвижного P_2O_5 . Например, учеными Нижегородской ГСХА, по наблюдениям в одном из хозяйств в 2014 и 2019 гг., отмечено снижение этого показателя за 5 лет с 116 до 85 мг/кг [2]. Напротив, есть примеры положительного влияния применения аммофоса, что обнаружено на полях Новосибирской и Белгородской обл. [3, 4]. Уровень химизации земледелия тесно связан с продуктивностью культур. Учеными Башкирского НИИСХ проанализировано, что урожайность зерновых культур в 23-х хозяйствах, тратящих на удобрения по 191 руб./га, составила в среднем 25.1 ц/га, а в 8 предприятиях при затратах 1436 руб./га она оказалась намного больше – 33.0 ц/га [5].

Известно, что фосфор проявляет положительное влияние на урожайность только при хорошей обеспеченности растений азотом. Такие условия

¹ Исследование выполнено в Курганском НИИСХ – филиале УрФАНИИЦ УрО РАН, в лабораториях агрохимии и земледелия в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002 “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, рационального применения пестицидов и биопрепаратов, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

складываются после парового поля, а в других посевах — при совместном внесении азота и фосфора [6, 7]. По мнению А.А. Завалина и соавторов [8], зависимость урожайности от удобрений и ГТК межфазных периодов вегетации имеет сложный нелинейный характер и наиболее точно описывается уравнениями 2-го порядка с четко выраженными областями оптимумов. В.Г. Минеевым с соавторами отмечено, что при пониженной температуре воздуха фосфорное удобрение действовало сильнее [9]. Например, на мощном черноземе Мироновской опытной станции бессменная озимая пшеница без удобрения имела среднюю урожайность 11.7, в севообороте — 25.4, на фоне удобрений соответственно 20.8 и 30.2 ц/га [10].

Способ обработки почвы также регулирует наличие P_2O_5 и изменчивость этого показателя в зависимости от сезона. Например, на выщелоченном черноземе в опыте СибНИИЗХим от весны до осени содержание P_2O_5 в черном пару возрастало на 70% при глубокой безотвальной обработке, на 41% — на фоне минимальной обработки и на 22% — при вспашке. Средняя урожайность зерновых культур за 3 ротации в вариантах этого эксперимента была довольно близкой: без удобрений урожайность зерновых культур в зернопаровом севообороте на фоне вспашки была равна 15.0, при минимальной обработке — 13.5, при внесении удобрений — 24.3 и 23.5 ц/га [11]. На выщелоченном тяжелосуглинистом черноземе в опыте Ставропольского ГАУ потери продуктивности севооборота на фоне поверхностной обработки почвы по отношению к вспашке достигали 7–9 ц з.е./га [12]. Поэтому цель работы — изучение влияния применения фосфорного удобрения на варьирование прибавок урожайности сельскохозяйственных культур в условиях Зауралья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент заложен в 1971 г. заведующим отделом агрохимии В.И. Волынкиным на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ. Автор статьи — исполнитель этого опыта с 1993 г. по настоящее время. Исследование в течение 7-ми ротаций в 1971–1999 гг. вели в зернопаровом севообороте кукуруза–две пшеницы–овес. Культуры выращивали при ежегодной вспашке. В конце этого периода в земледельческой практике Курганской и других областей произошли изменения — сокращение посевов кормовых культур и объемов проведения вспашки. Поэтому в 2000 г. в опыте севооборот был заменен бессменной пшеницей, высеваемой после стерни. По результатам 52-летнего стационарного опыта сделан анализ изменчивости прибавок

урожайности сельскохозяйственных культур при добавлении фосфорного удобрения к азотному.

Почва на участке под опытом — выщелоченный чернозем маломощный малогумусный среднесуглинистый с содержанием гумуса в слое 0–20 см в контроле — 4.5% и подвижных соединений: P_2O_5 (по Чирикову) — 38–40 (низкое), K_2O — 250–350 мг/кг (высокое). За 52 года проведения опыта показатель pH_{KCl} изменился с исходной величины 6.0–6.2 до 5.15 ед. pH в контроле и до 5.0 ед. в варианте N60P20. Фракционный состав соединений фосфора в выщелоченном черноземе Центрального опытного поля Курганского НИИСХ изучала Л.Д. Рыбина [13]. Результаты анализа показали, что фосфорное удобрение в дозах P60–90 на фоне внесения азота (вносили с 1978 г.) в севообороте кукуруза–пшеница через 6 лет повысило величину содержания всех фракций фосфатов. Высокодоступная фракция Ca_1-P (мг/100 г) увеличилась с 1.8 до 3.0–6.0, еще заметнее увеличилась фракция $Al-P$ — с 0.6 до 2.2–2.6 мг/100 г. Близкое к удвоению было повышение содержания фракций Ca_2-P (с 0.8 до 1.6–2.1 мг/100 г) и $Fe-P$ (с 2.5 до 4.0–4.8 мг/100 г). Содержание самой инертной фракции под влиянием удобрений изменилось мало — с 10.4 до 11.4–11.8 мг/100 г.

В стационарном опыте по изучению состава удобрения и доз азота применяли $P_{сд}$ в севообороте и АФ — на бессменной пшенице и N_{aa} . Срок и способ внесения — предпосевной локальный дисковой сеялкой СЗ-3.6 на 4–5 см. Дозы применения азота (кг/га) в посеве кукурузы — N40–80–120, на зерновых — N20–40–60 (в среднем в севообороте N25–50–75), на бессменной пшенице — N20–40–60. Применяли дозу фосфора P40 в первой части опыта и P20 — во второй. Учитывая последствие суммы фосфора P1000 (P40 за 25 лет), внесенной в 1971–1995 гг., средневзвешенная доза во 2-й период опыта к 2022 г. была равна P25, она отражала агрохимический фон. При вычислении этой дозы учтено не только применение P40 и P20, но и 12-летнее отсутствие фосфорного удобрения в 1996–2007 гг., когда пшеницу выращивали только на фоне последствия длительного применения P40. Далее 15 лет, в 2008–2022 гг. вносили P20, т.е. суммарная доза за 52 года равнялась P1300. Сравнивали одностороннее азотное удобрение и совместное его применение с фосфором.

Площадь делянки в m^2 : общая — 270 (6×45), учетная — 90 (2×45) m^2 . Повторность трехкратная. Высевали районированные сорта сельскохозяйственных культур. В севообороте при посеве зерновых и кукурузы использовали сеялки СЗ-3.6 и СУПК. Бессменную пшеницу сеяли после оставленной с осени стерни стерневой сеялкой СКП-2.1 с сошником культиваторного типа. Уход за посевами состоял из применения гербицидов:

Таблица 1. Варьирование прибавок от добавления фосфорного удобрения Р40 к азотному N50 в разных погодных условиях, ц з.е./га, 1971–1999 гг.

Группы показателей											
очень высокие			высокие			средние			низкие		
±, ц/га	t, °C*	W ₀₆ , мм	±, ц/га	t, °C*	W ₀₆ , мм	±, ц/га	t, °C*	W ₀₆ , мм	±, ц/га	t, °C*	W ₀₆ , мм
7.0	15.0	48	3.0	12.9	46	2.0	23.6	109	0.7	17.9	71
4.6	21.4	37	3.8	16.3	110	2.6	13.5	72	1.0	17.7	29
4.3	14.3	41	3.0	18.6	67	2.6	17.2	70	1.6	10.5	59
8.1	14.8	57	3.1	13.1	43	2.2	15.1	54	1.0	16.3	15
6.6	11.3	53	3.3	12.8	39				–2.0	18.5	76
4.0	14.8	3**	2.9	23.6	34				–0.3	20.7	28
5.7	11.5	69	3.1	11.3	26				1.5	17.5	39
			3.6	12.9	45				1.6	11.5	49
			3.3	21.4	58				0.2	19.1	63
Среднее											
5.8	14.7	56	3.2	15.9	52	2.4	17.4	76	0.6	16.6	48
Окупаемость Р40, кг/кг											
14.5			8			6			1.5		

Примечание. Урожайность кукурузы и овса представлена в зерновых единицах (з.е.). Величина HCP_{05} за 29 лет была в пределах 1.9–3.5 ц з.е./га.

*Температура воздуха в 1-й декаде июня. То же в табл. 2.

**Низкая обеспеченность влагой в июне 1987 г. компенсирована майскими осадками мая (30.2 мм) и 1-й декады июля (32.8 мм).

2.4Д – в севообороте и смесь препаратов Дротик + Гранат – на бессменной пшенице. Учет урожая кукурузы вели ручным скашиванием и взвешиванием массы с отбором растений для определения влажности, зерновых – комбайном Sampro-500 напрямую с отбором образца для анализа влажности и сорности бункерной массы зерна.

Погодные условия за 52 года исследования характеризовались повторением засух в июне или июле при ГТК за май–август – 0.30–0.80. В эти годы осадки июня снижались до 6–38 мм при среднем многолетнем показателе 51 мм. Благоприятных по увлажнению было 20 лет в годы севооборота и всего 6 лет при выращивании бессменной пшеницы, когда в главный период формирования урожая – июнь – выпадало 48–122 мм осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продуктивность зернопропашного севооборота равнялась 24.2 в контроле, 28.1 – на фоне N50 и 33.0 ц к.е./га – при применении N50P40. Урожайность кукурузы в тех же вариантах составила 42, 52 и 63 ц сухого вещества/га, зерновых – 18, 20 и 24 ц зерна/га; 1-й и 2-й пшеницы после кукурузы – 15.8, 18.3 и 21.5 ц зерна/га и овса – 23.8, 25.6 и 28.4 ц зерна/га. При бессменном возделывании пшеницы после стерни сбор зерна снизился в контроле и вариантах N40 и N40P25 до 10, 12 и 15.6 ц/га.

При средних прибавках от добавления фосфора к азоту 3–4 ц/га в ряде лет отмечены более высокие урожаи – 4.6–8.1 ц/га, а в части других лет – отсутствие прибавки урожайности. Отмечено, что в холодную весну растения страдают от недостатка фосфора и сильнее реагируют на его применение [9]. В такие годы на фонах без фосфора у кукурузы наблюдали фиолетовый оттенок окраски листьев, у всходов зерновых – бледно-зеленый цвет. В этих условиях растения активнее используют фосфор гранул удобрения, чем фосфор почвы. В теплую и влажную погоду при более высокой температуре воздуха корневая система культур мощнее, и растения полнее используют почвенные запасы фосфора, а эффект от фосфорного удобрения меньше. При недостатке влаги малоподвижный фосфор и почвы, и удобрений потребляется растениями слабее.

По величине влияния фосфора, добавленного к азоту, на прирост урожайности культур 29 лет периода севооборота разделили согласно величине прибавок на 4 группы. Семь лет их величина была очень высокой – в пределах 4.6–8.1, 9 лет высокой – 2.9–3.8 ц з.е./га. В течение 4-х лет она была средней – 2.0–2.6 и 9 лет – низкой (–2.0–1.6 ц з.е./га). Эти данные были сопоставлены с погодными факторами (табл. 1).

Отмечены несколько явных отклонений температурного режима против большей части показателей в каждой из групп выборки. Замечено, что в 1-й группе очень высоким эффектом от при-



Рис. 1. Уровень прибавок урожайности (ц з.е./га) от добавления P40 к N50 в зависимости от температуры воздуха в первой декаде июня, 1971–1999 гг.

менения фосфорного удобрения чаще сопутствовали низкие температуры воздуха 1-й декады июня (11–15°C). Во 2-й группе за 9 лет 6 раз высокие прибавки были получены в условиях, когда в начале июня температура воздуха была в пределах 11–16°C. За 4 года со средними прибавками в 2 из них тоже была отмечена пониженная температура. Значительно теплее было в большей части лет, относящихся к последней группе (17–20°C), исключением были всего 2 года. Достаточно стройной становится обсуждаемая зависимость, если исключить нетипичные данные в 2-х контрастных группах (рис. 1).

Для подсчета корреляции желателен длинный ряд данных, но вмешательство отклонений снижает ее величину. Для 29 лет 1-го периода опыта связь с температурой начала июня выразилась коэффициентом -0.331 , с осадками июня — 0.159 . Анализ изменчивости прироста урожая от фосфорного удобрения сделан и для результатов 2-го периода опыта. По этим данным, зависимость прироста урожая от тех же показателей погоды выражалась коэффициентами -0.177 и 0.567 . В целом для 52-х имеющихся дат подсчеты связи уровней прибавок с температурой воздуха в 1-й декаде июня дали коэффициент корреляции, равный -0.448 , с температурой июня — -0.338 и с осадками июня — 0.09 . По выборке, сделанной для рис. 1, связь прибавок с температурой 1-й декады июня оказалась значимой и равнялась -0.848 .

В посевах бессменной пшеницы фосфор вносили в дозе P20, поэтому к очень высоким прибавкам урожайности зерна отнесены уровни 3.7–3.9 ц/га, которые обеспечили окупаемость, равную 18.5–19.5 кг/кг. В этом случае также наиболее высокими оказались эффекты в годы, когда среди 9 лет 8 раз температура 1-й декады июня равня-

лась 12–16°C. В большинстве лет высокие прибавки получены при достаточной сумме июньских осадков (табл. 2).

Наибольшее варьирование прибавок урожайности было в 1-й группе для бессменной пшеницы. Они менялись от 3.7 до 9.4 ц зерна/га при коэффициенте вариации 20.3%.

Следует заметить, что размещение гранул фосфорного удобрения в 1-й и 2-й периоды опыта было различным. За счет ежегодной вспашки в севообороте гранулы суперфосфата перемешивались в слое почвы 0–22 см. В стерневых посевах аммофос, внесенный дисковой сеялкой на глубину 4–5 см, мог немного перемещаться лишь при работе посевной культиваторной лапы на 5–6 см. Однако в оба периода опыта действие фосфора сильнее зависело от сложившихся погодных условий.

Несмотря на различия в размещении гранул передвижение соединений фосфора в нижние слои почвы в обоих случаях осуществлялось корневой системой культур. В годы севооборота в 1986 г. сделали анализ содержания P_2O_5 (по Францесону) в 3-х горизонтах по 20 см почвы на глубину 60 см (рис. 2). К весне 1986 г. удобрения в севообороте применяли уже 15 лет при регулярной вспашке. Показано, что на фонах применения суперфосфата подвижный фосфор в основном был сосредоточен в слое 0–20 см. Два фона — неудобренный и одностороннего азотного удобрения — были бедны соединениями фосфора, а в вариантах с внесением суперфосфата верхний слой был обогащен подвижным фосфором. Причем, вполне очевидно, что одностороннее фосфорное удобрение культуры севооборота использовали значительно меньше, чем внесенное совместно с азотом.

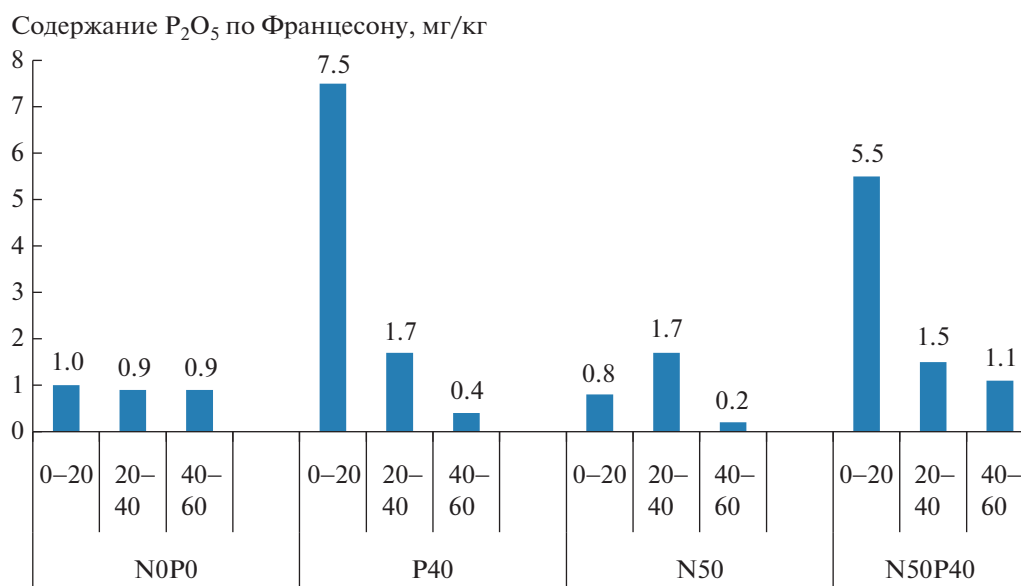


Рис. 2. Расслоение содержания P_2O_5 (по Францесону) по горизонтам в слое 0–60 см почвы, 1986 г.

В почве под посевами бессменной пшеницы 2 раза определяли степень расслоения содержания подвижного фосфора по слоям толщиной 10 см в слое 0–30 см. За 6-летний период с весны 2015 до весны 2021 г. произошло увеличение количества P_2O_5 во всех слоях почвы. На удобряемом фоне большая часть фосфора была сосредоточена в слое 0–10 см. Обогащение 3-го слоя соединениями фосфора объясняется пополнением P_2O_5 от разложения отмерших корней, усвоивших фосфор почвы и удобрения (табл. 3).

Как в контроле, так и на фоне применения азотно-фосфорного удобрения показатели содержания P_2O_5 за эти годы повысились, т.к. уровень урожайности бессменной пшеницы чаще был в пределах 8–10 ц/га в контроле и 10–15 ц/га – при внесении удобрения. Лишь в один благоприятный 2017 г. были получены значительные урожаи – 16.8 ц/га в контроле и 26.2 ц/га – на фоне азотно-фосфорного удобрения. Дополнительный урожай на фоне применения N40P25 в эти годы менялся от 2.1 до 9.4 ц/га и в среднем составил 5.0 ц/га при

Таблица 2. Варьирование прибавок урожайности зерна бессменной пшеницы от добавления фосфорного удобрения P20 к азотному N40 в разных погодных условиях, ц зерна/га, 2000–2022 гг. (HCP_{05} в пределах 1.2–3.2)

Очень высокие			Высокие			Средние			Низкие		
±, ц/га	t, °C*	W_{06} , мм	±, ц/га	t, °C*	W_{06} , мм	±, ц/га	t, °C*	W_{06} , мм	±, ц/га	t, °C*	W_{06} , мм
5.3	12.4	109	3.4	19.2	27	2.3	10.5	28	–0.5	18.4	52
3.7	14.6	122	3.2	16.4	60	2.8	14.0	16	0.7	19.0	28
3.9	13.8	60	3.6	17.2	13	2.5	20.4	16	0.6	21.2	18
3.8	20.4	47				2.7	14.5	32	0.8	15.3	9
3.9	15.0	19				2.6	15.3	68			
9.4	18.0	100				2.5	19.0	44			
4.6	15.8	6*									
5.3	15.4	48									
4.2	16.4	38									
6.9	16.2	83									
Среднее											
5.1	15.8	63	3.4	17.6	33	2.6	15.6	34	0.4	18.5	27
Окупаемость P20, кг/кг											
26			17			13			2		

*Недостаток осадков в июне в 2014 г. был компенсирован равномерными осадками июля в сумме 102 мм.

Таблица 3. Распределение содержания P_2O_5 (по Чирикову) по слоям толщиной 10 см в слое 0–30 см почвы, мг/кг

Вариант/Слой	Контроль		N40P25	
	2015 г.	2021 г.	2015 г.	2021 г.
0–10	52	62	102	113
10–20	38	56	56	68
20–30	35	69	62	85

урожайности в контроле и варианте N40P25 10 и 15 ц/га соответственно.

Представляет интерес баланс фосфора за эти 6 лет. При среднем содержании фосфора в зерне неуборенной и удобренной пшеницы в эти годы 0.37 и 0.49%, вынос этого элемента урожаями зерна равнялся 3.7 и 7.4 кг/га в год. Солому не отчуждали, но в ней содержалось всего 0.17 и 0.21% фосфора, что означало вынос соломой фосфора в размере 2.6 и 4.5 кг/га. Общий вынос равнялся 6.3 и 12.9 кг/га в год, за 6 лет – 37.8 и 77.4 кг/га с разницей в 39.6 кг/га при сумме внесенного за 6 лет фосфора 120 кг/га. Баланс фосфора на удобряемом фоне был положительным, поэтому неиспользованный растениями фосфор пополнял запасы подвижного P_2O_5 в почве.

За динамикой содержания подвижного фосфора в эксперименте следили ежегодно. Наблюдения за фоном, где применяли аммофос, свидетельствовали о постепенном повышении содержания P_2O_5 , особенно после сухих неурожайных лет. При внесении одного азота в течение 52 лет содержание P_2O_5 оставалось на исходном уровне – 38–40 мг/кг (табл. 4).

Экономическая оценка дозы P40 указывает на определенное ее завышение в 1-й части опыта. Цена аммофоса поднялась в последние годы до 57 тыс. руб./т, или 114 руб./кг фосфорных удобрений. Даже применение P20 при современной стоимости аммофоса эффективным оказывается не каждый год (табл. 2). Покупка удобрения для дозы P20 обходится 2280 руб./га, с расходами на

припосевное внесение и уборку дополнительного урожая – 2905 руб./га. При повышенных сборах зерна в Курганской обл. цена пшеницы 3-го класса уменьшилась до 12 тыс. руб./т. Средние прибавки в опыте от применения N40P20 и непосредственно от добавления P20 к азоту за 2000–2022 гг. были равны 5.6 и 3.1 ц/га. Стоимость прироста урожая от применения фосфора составила 3720 руб./га. Следовательно, прибыль была очень мала – 815 руб./га. На 1 руб. затрат приходилось 0.28 руб. прибыли. Какой можно сделать вывод из этих результатов? Можно пойти по пути небольшого снижения дозы до P10–15 при обязательном использовании припосевного способа внесения. Если для внесения P15 предусмотрена установка тукового аппарата комбинированной сеялки, то применение P10 можно реализовать внесением P20 через год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ изменчивости прироста урожайности сельскохозяйственных культур от применения фосфорных удобрений в дозах P40–20, добавленных к азотному N50–40 за 52 года в стационарном опыте Курганского НИИСХ показал сильное варьирование величины прибавок. Эффекты в зернопропашном севообороте от применения фосфора в среднем в 4-х группах данных равнялись 5.8, 3.2, 2.4 и 0.6 ц з.е./га. Для бессменной пшеницы после стерневого фона средние прибавки в 4-х группах лет были близки к показанным в севообороте: 5.1, 3.4, 2.6 и 0.4 ц зерна/га соответственно. За небольшими исключениями выявлена связь величины прибавки урожайности от применения фосфора и температуры воздуха в 1-й декаде июня. Высокому приросту урожайности сопутствовала пониженная температура воздуха в 1-й декаде июня и достаточная обеспеченность растений влагой. Связь с количеством осадков заметнее проявилась для бессменной пшеницы. Окупаемость дозы P40 в севообороте при высоких прибавках урожайности культур была на хорошем уровне – 8–14 кг з.е./кг фосфора, опускаясь в другие годы до 6.0–1.5 кг/кг. Оплата

Таблица 4. Содержание P_2O_5 (по Чирикову) в слое почвы 0–20 см почвы под посевами бессменной пшеницы после стерни, мг/кг

Вариант/Год	2009–2012	2013–2016	2017–2020	2020	2021	2022	Среднее за 15 лет
Контроль	50	43	48	36	59	64	48
N40	39	45	39	32	40	47	41
N40ПР + P20 (P25)	77	87	84	112	90	102	86
HCP_{05}	5 мг/кг ($F_{\text{факт}} = 54.92$, $F_{\text{табл}} = 4.75$)						

P20 прибавкой зерна бессменной пшеницы менялась от 13–17–26 кг/кг соответственно в годы с высокими и средними прибавками до 2 кг/кг при низкой эффективности фосфора. Если оплата фосфора приростом урожайности культур в большинстве лет была положительной, то окупаемость фосфора в рублях при неблагоприятном соотношении стоимости 1 кг фосфора в виде аммофоса и 1 кг пшеницы (114 : (12–9.5)) была низкой – 0.28 руб. прибыли/руб. затрат (815 : 2905).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев В.Г., Аканова Н.И. Агроэкологическая оценка эффективности аммофоса в технологии возделывания различных сельскохозяйственных культур // Плодородие. 2020. № 1 (112). С. 3–6.
2. Титова В.И., Разин Т.С., Ветчинникова О.И. Динамика агрохимических показателей почв ООО «Ардатовское» во времени и оценка их устойчивости к антропогенному воздействию // Агрохим. вестн. 2021. № 1. С. 8–12.
3. Морозов С.А., Куркова С.В. Оценка агрохимических показателей плодородия почв пашни в условиях северо-запада, запада и юго-запада Новосибирской области // Агрохим. вестн. 2022. № 2. С. 3–7.
4. Суринов А.В. Динамика агрохимических показателей плодородия черноземов лесостепной зоны ЦЧР // Агрохим. вестн. 2022. № 2. С. 8–14.
5. Абрадашитова А.Т., Стовба Е.В. Эффективное использование земель сельскохозяйственного назначения как ключевой фактор развития сельских территорий региона // Эконом. сел.-хоз. и перерабат. предприятий. 2013. № 2. С. 35–37.
6. Шафран С.А., Козеичева Е.С. Продуктивность ярового ячменя и окупаемость азотных удобрений в зависимости от содержания элементов питания в основных типах почв России // Агрохимия. 2016. № 3. С. 11–22.
7. Волынкина О.В. Фосфорное удобрение усиливает действие азота на урожай и качество пшеницы // Пробл. агрохим. и экол. 2019. № 2. С. 74–80.
8. Завалин А.А., Пасынкова Е.Н., Пасынков А.В. Зависимость урожая зерна яровой пшеницы от гидро-термических условий межфазных периодов вегетации // Плодородие. 2010. № 4. С. 7–9.
9. Минеев В.Г., Лебедева Л.А., Васильева Н.Г. Влияние метеоусловий на варьирование величины оптимального содержания фосфора в почве для растений ячменя // Агрохимия. 2010. № 6. С. 50–58.
10. Захарченко И.Г., Пироженов Г.С., Сухобрус С.В. О влиянии бессменных культур на плодородие почвы // Почвоведение. 1962. № 7. С. 10–18.
11. Синещев В.Е., Ткаченко Г.И. Динамика содержания легкоподвижного фосфора в почве при минимизации механической обработки в лесостепи Приобья // Агрохимия. 2016. № 11. С. 19–24.
12. Есаулко А.Н., Петрова Л.И., Агеев В.В. Повышение эффективности применения удобрений на основе оптимизации систем удобрения в севооборотах Центрального Предкавказья (К 40-летию стационара Ставропольского ГАУ) // Плодородие. 2017. № 1. С. 8–11.
13. Рыбина Л.Д. Способы внесения различных доз гранулированного суперфосфата при ежегодном применении в севообороте // Агрохимия. 1986. № 3. С. 22–27.

Effect of the Use of Phosphorus Fertilizer on the Variation of Crop Yield Increments¹ in the Conditions of the Trans-Urals

O. V. Volynkina

Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the RAS
ul. Belinskogo 112a, Yekaterinburg 620142, Russia

E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

The variability of crop yield growth from the use of phosphorus fertilizer in doses of P40–20 added to nitrogen fertilizer in a 52-year stationary experiment of the Kurgan Research Institute of Agricultural Sciences is shown. The study of the effectiveness of phosphorus was conducted first in the grain crop rotation during annual plowing, then in permanent wheat crops after a stubble background. The yield increases were very different over the years. With a few exceptions, the relationship of the increase in yield from phosphorus with the air temperature of the 1st decade of June is shown. High increases were accompanied by low air temperature in the 1st decade of June and sufficient provision of plants with moisture. The connection with precipitation was more clearly manifested in permanent wheat crops. The payback of the P40 dose by the increase in yield in grain units in crop rotation in years with high fertilizer efficiency was at the level of 8–14 kg/kg, falling in other conditions to 6–1.5 kg/kg. The payment of P20 by increments of permanent wheat grain varied from 13–17–26 kg/kg in years with high and medium increments up to 2 kg/kg with low effects from the use of phosphorus fertilizer.

Key words: grain-tillage crop rotation, permanent wheat after stubble, additions from phosphorus fertilizer against the background of nitrogen application, weather conditions.

УДК 631.811.98:633.511:635.646

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА РОСТА ФЛОРОКСАН С ГЛИЦИРРИЗИНОВОЙ КИСЛОТОЙ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ХЛОПЧАТНИКА И БАКЛАЖАНА¹

© 2023 г. Р. П. Закирова^{2,**}, С. С. Халиков^{1,*}, С. М. Тураева²,
Э. Р. Курбанова², Н. Д. Чкаников¹

¹Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
119991 Москва, ул. Вавилова, 28, Россия

²Институт химии растительных веществ АН Республики Узбекистан
100170 Ташкент, ул. М. Улугбека, 77, Республика Узбекистан

*E-mail: salavathalikhov@mail.ru

**E-mail: ranozakirova@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Механохимическая модификация субстанции флороксана с помощью глицирризиновой кислоты позволила увеличить растворимость препарата и расширить спектр и эффективность его действия.

Ключевые слова: флороксан, регулятор роста растений, хлопчатник, баклажаны, биологическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0002188123050125, **EDN:** USROJJ

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии позволяют контролировать развитие растений при использовании стимуляторов роста растений (СРР), которые могут повышать их иммунитет и устойчивость к плесени, грибкам и прочим паразитам, нивелировать негативное влияние пестицидов, способствовать правильному формированию структуры побегов, ускорять рост растений, приближать процессы цветения и созревания, улучшать качество плодов и увеличивать их количество. Перспективным стимулятором роста растений с медиаторным ответом на стрессовые воздействия является флороксан—гидрохлоридэтилового эфира 2-гидрокси-2-(4-метиламинофенил)-3,3,3-трифторпропионовой кислоты, который положительно зарекомендовал себя при предпосевной обработке семян рапса, кукурузы и подсолнечника [1], пшеницы [2] и хлопчатника [3]. При этом флороксан позволил улучшить морфометрические параметры проростков яровой пшеницы (длины coleoptilia, семядольного листа, корней и их количества), энергию прорастания и всхожесть ее

семян, а также степень подавления семенной инфекции [4–6]. В последние годы флороксан успешно применяли и в комплексных протравителях с антидотным действием для защиты культурных растений от остатков гербицидов в почвах. При этом полученные препараты способствовали значительному повышению энергии прорастания и увеличению биомассы растений в почвах, зараженных препаратом Зингер [7, 8].

Недостатком флороксана является его плохая растворимость в воде и нестабильность при хранении. Для устранения этих факторов был предложен механохимический способ обработки флороксана с полимерами и получением препарата, устойчивого при хранении. Препарат, образуя стабильные и удобные для обработки семян и растений рабочие растворы, способствует лучшему прилипанию к семенам и листьям, а также проникновению препарата через растительные мембраны [2–4]. Эти исследования по разработке форм применения препаратов для защиты растений являются актуальными и востребованными. Цель работы — создание стабильной водорастворимой препаративной формы на основе флороксана для стимуляции роста сельскохозяйственных культур.

¹ Научно-практическая работа по подготовке препаратов на основе флороксана выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Препарат Флороксан (ФЛ) — гидрохлорид N-метил-4-(1-гидрокси-1-карбометокси-три-фтор-этил)-анилина [1] представляет собой белые кристаллы, $T_{пл} = 188–190^{\circ}\text{C}$, брутто формула — $\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{NF}_3\text{O}_3$. Произведен препарат в ИНЭОС РАН, Москва.

Глицирризиновая кислота (ГК) — тритерпеновый гликозид из экстракта корня солодки. Его химическое название — 20 β -карбоксит-11-оксо-30-норолеан-12-ен-3 β -ил-2-О- β -D-глюкопиранозил-альфа-D-глюкопиранозидуронозная кислота. Произведен препарат в компании ООО “Вистерра”, Алтайский край, с. Алтайское.

Получение твердой дисперсии флороксана с глицирризиновой кислотой. В фарфоровый барабан (объем 1.0 л) шаровой мельницы МФВ-4 (ООО “Техно-Центр”, г. Рыбинск, РФ) последовательно загружали 9.0 г глицирризиновой кислоты, 1.0 г флороксана и 40 металлических шаров диаметром 25 мм массой 2200 г (модуль процесса 1 : 22). После предварительного перемешивания компонентов в течение 10 мин при частоте вращения барабана 20–25 об./мин продолжают механообработку при частоте вращения барабана 70–80 об./мин в течение 3 ч. Получали легкосыпучий бежевый порошок, представляющий собой твердую дисперсию (ТД) состава ФЛ : ГК = 1 : 9.

Растворимость ТД на основе ФЛ определяли методом ВЭЖХ при следующих условиях: хроматограф жидкостной “Agilent 1100” с аналитической колонкой “Hypersil HyPURITY Elite C18” (150 $\times$ 4.6 мм, 5 мкм), температура колонки 30 $^{\circ}\text{C}$, детектор диодно-матричный, элюент — ацетонитрил-ацетатный буфер pH = 3.4 (1 : 1), скорость потока — 1 мл/мин, детектирование при длине волны 260 нм.

Определение ростстимулирующей активности ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 на хлопчатнике. Вегетационные мелкоделяночные опыты проводили на территории Института химии растительных веществ (г. Ташкент, Республика Узбекистан) на средневолокнистом хлопчатнике *G. hirsutum* сорта Султон в 2019 г. Семена хлопчатника были предоставлены научно-исследовательским институтом селекции, семеноводства и агротехнологии выращивания хлопчатника.

Семена хлопчатника замачивали в исследованных растворах таким образом, чтобы уровень жидкости над семенами не превышал 1 см. В качестве исследованных растворов использовали водопроводную воду (контрольный вариант), водный раствор флороксана в массовой концен-

трации 0.00001% и водный раствор заявляемой композиции в массовой концентрации 0.0001%.

Посев проводили утром на следующий день, после 18-часового замачивания. Площадь опытной делянки составляла 3 м². Опыт закладывали в четырехкратной повторности. Посев делали вручную по 3 семени на глубину 3 см через каждые 10 см.

Фенологические наблюдения за ростом и развитием хлопчатника проводили весь вегетационный период. Они включали в себя определение энергии прорастания и всхожести семян, учет высоты главного стебля, количества симподиальных ветвей, бутонов, цветков и зеленых коробочек.

Определение влияния ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 на растения баклажана. Полевые мелкоделяночные опыты проводили в Кибрайском р-не Ташкентской обл. на баклажанах сорта Шарапова F1. Подготовку почвы и уход за посевами осуществляли в соответствии с рекомендациями по возделыванию культуры баклажана [9]. Почва — типичный серозем с неглубоким залеганием грунтовых вод, по гранулометрическому составу — среднепылеватый суглинок. Предшественник — перец.

Посев рассады из необработанных семян баклажана осуществили 10 апреля 2020 г. на площади 100 м² на делянках при их рандомизированном расположении. Во время вегетации проводили ручное рыхление почвы после полива и прополки сорняков. За вегетационный период на опытном участке было сделано 4 полива.

Действие флороксана и заявляемой композиции изучали путем двухкратного опрыскивания посевов баклажана водными растворами стимуляторов роста с интервалом 7 сут в фазе бутонизации, когда температура воздуха достигла 25–27 $^{\circ}\text{C}$ в вечернее время. Рабочие растворы готовили из расчета 30 мг/га в случае флороксана и 300 мг/га — композиции, их расход составлял 10 л/100 м². Опрыскивание проводили с помощью ранцевого ручного опрыскивателя. В качестве контрольных вариантов использовали делянки с необработанными посевами.

Повторность опытов четырехкратная. Математическую обработку полученных данных и расчет статистических параметров проводили с использованием пакета компьютерных программ Microsoft Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее, помимо водного раствора флороксана, были описаны его препаративные формы в виде суспензионных концентратов в водных раство-

Таблица 1. Растворимость в воде образцов композиции флороксана с ГК

Образец ТД на основе ФЛ и ГК при различных условиях механообработки (м/о)	Растворимость, мг/л	
	абсолютная	увеличение
Флороксан	9.3	—
Физическая смесь ФЛ : ГК = 1 : 9	10.2	1.1
Твердая дисперсия ФЛ : ГК = 1 : 9 после 1 ч м/о	29.5	3.2
Твердая дисперсия ФЛ : ГК = 1 : 9 после 2 ч м/о	41.8	4.5
Твердая дисперсия ФЛ : ГК = 1 : 9 после 3 ч м/о	50.1	5.4
Твердая дисперсия ФЛ : ГК = 1 : 9 после 4 ч м/о	51.0	5.5

рах натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (NaКМЦ) и других производных целлюлозы [1, 3]. Применение всех этих препаративных форм за счет повышения водорастворимости флороксана способствовало увеличению его ростстимулирующей активности. Недостатками этих форм были: гидролиз и окисление субстанции флороксана в водной среде при длительном хранении его водной и суспензионных форм; неэффективность использования рабочих растворов для опрыскивания вегетирующих растений (кратковременный контакт в отличие от замачивания семян), т.к. ни одна из описанных форм не обладала способностью прилипать к поверхности растений.

Нами предложен принципиально новый подход к совершенствованию свойств флороксана путем его механохимической модификации с глицирризиновой кислотой, которая обладает комплексом полезных свойств: ГК характеризуется высокой солюбилизующей активностью. Ее молекула создает внутрисферное пространство, удобное для образования соединений включения (комплексов типа “гость—хозяин”) и мицеллярных систем, за счет которых в разы повышается растворимость биологически активных молекул (лекарственных и антигельминтных субстанций, фунгицидов и др.), которые плохо растворимы в воде, и их стабильность [10–13]; ГК обладает повышенной проницаемостью через растительные мембраны, что увеличивает эффективность действия биологически активных субстанций за счет улучшения их проникновения в целевой орган [14–17]. В заявляемом изобретении таким органом служат семена и листья растений; ГК является растительным метаболитом, поэтому экологически безопасна; ГК получают в промышленных масштабах из распространенного на территории РФ сырья — корней более 10 видов солодки [18].

При совместной механообработке ФЛ и ГК, взятых в весовом соотношении 1 : 9 образуется ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 в виде сыпучего бежевого порошка, который в воде образует супрамолеку-

лярный комплекс с повышенной растворимостью (табл. 1) для стимуляции роста сельскохозяйственных культур.

Показано, что при приготовлении так называемой физической смеси флороксана с глицирризиновой кислотой растворимость флороксана в воде увеличивалась незначительно. Проведение механохимической обработки смеси флороксана с ГК приводило к заметному возрастанию растворимости флороксана, особенно существенному при увеличении времени обработки до 3-х ч. Дальнейшая механообработка не сопровождалась значительным увеличением растворимости, поэтому оптимальным временем механообработки было выбрано время 3 ч.

Определение ростстимулирующей активности ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 на хлопчатнике. Исследование ростстимулирующей активности ТД-композиции флороксана и глицирризиновой кислоты проводили на хлопчатнике и баклажанах при использовании 0.0001%-ного водного рабочего раствора.

Фенологические наблюдения за ростом и развитием хлопчатника проводили весь вегетационный период. Результаты испытаний представлены на рис. 1 и 2.

В результате предпосевной обработки семян ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 энергия прорастания оказалась больше контроля на 7.4, всхожесть — на 5.3%, при обработке флороксаном эти показатели были больше контроля соответственно на 3.2 и 2.9%.

Высота растений на 21-е сут в опытном варианте с применением ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 составила 13.6 см и превысила контроль на 10.6%, в опыте с применением флороксана — 13.7 см и превысила контроль на 11.4%.

Показатель роста главного стебля (количество настоящих листьев и количество бутонов) определяли на 56-е сут. На период фенологических наблюдений осадков не наблюдалось, средняя

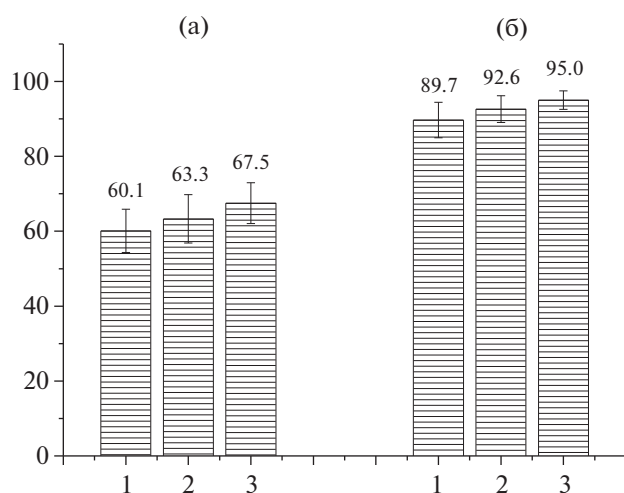


Рис. 1. Влияние предпосевного замачивания семян стимуляторами роста на основе флороглюксана на энергию прорастания и всхожесть хлопчатника: (а) — энергия прорастания, (б) — всхожесть; варианты: 1 — контроль без обработки, 2 — флороглюксан, 3 — ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9. То же на рис. 2–4.

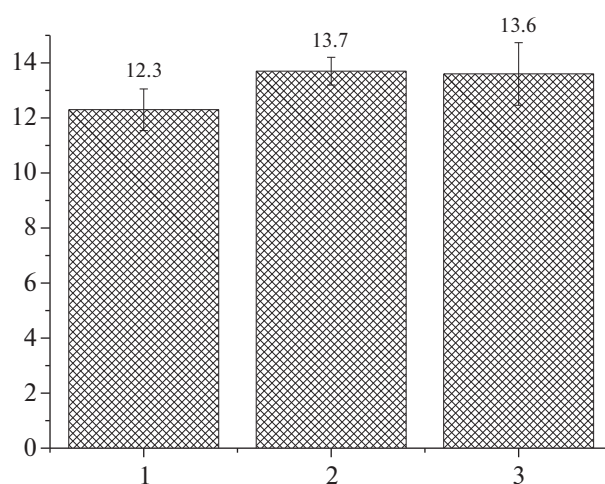


Рис. 2. Влияние предпосевного 18-часового замачивания семян стимуляторами роста на основе флороглюксана на рост хлопчатника.

дневная температура была на уровне статистической нормы — от 38 до 40°C. На 56-е сут длина главного стебля в варианте с применением ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 была равна 42.0 см и превысила контроль на 32.1%, количество листьев (19.4 шт.) — на 42.6%, количество бутонов (5.2 шт.) — на 174%.

В варианте с применением флороглюксана показатели длины стебля (37.9 см), по количеству листьев (18.6 шт.) и количеству бутонов (4.1 шт.) были больше контроля соответственно на 19.1, 36.7 и 116%.

Данные табл. 2 показали, что высокие морфометрические показатели хлопчатника (высота растений, количество листьев, количество бутонов) были характерны для всех опытных вариантов, с достоверным преимуществом ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9.

Результаты дальнейших наблюдений за ростом и развитием растений хлопчатника представлены в табл. 3. Учеты, проведенные на 83-и сут после посева, показали, что по морфометрическим показателям (высота растений, количество симподиальных ветвей, междоузлий, бутонов, цветков, коробочек и плодозлементов) высокая активность *СРР* со значительным преимуществом отмечена в опытном варианте с применением ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 по количеству симподиальных ветвей — на 3 шт., по количеству междоузлий — на 3.4 шт., по количеству бутонов — на 3.1 шт., по количеству коробочек — на 4.4 шт. больше, чем в контрольном варианте. По общему количеству плодозлементов хлопчатника этот вариант превышал контроль на 8.4 шт./растение и вариант применения флороглюксана — на 4.9 шт./растение.

Изучение влияния предпосевной обработки семян хлопчатника стандартной субстанцией флороглюксана на рост и развитие хлопчатника подтвердило ускорение динамики роста основного

Таблица 2. Влияние стимуляторов роста на основе флороглюксана на рост и развитие растений хлопчатника на 56-е сут после посева

Вариант	Массовая концентрация <i>СРР</i> в воде, %	Высота растений, см	Количество листьев, шт.	Количество бутонов, шт.
Контроль без обработки	0	31.8	13.6	1.9
ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9	0.0001	42.0	19.4	5.2
Флороглюксан	0.00001	37.9	18.6	4.1
HCP_{05}		1.8	1.3	0.8
S_x		0.6	0.4	0.3

Таблица 3. Влияние стимуляторов роста на основе флороксана на рост главного стебля, формирование куста и плодозлементов хлопчатника на 83-е сут после посева

Вариант	Массовая концентрация <i>СРР</i> в воде, %	Высота растений, см	Количество симподиальных ветвей, шт.	Количество междоузлий, шт.	Количество бутонов, шт.	Количество цветков, шт.	Количество коробочек, шт.	Количество плодозлементов, шт.
		на одно растение						
Контроль без обработки	0	62.3	6.6	6.9	5.1	0.89	2.4	8.4
ТД состава ФЛ : ГК (1 : 9)	0.0001	89.7	9.6	10.3	8.2	1.78	6.8	16.8
Флороксан	0.00001	88.6	8.4	8.9	7.2	1.85	4.2	13.3
<i>HCP</i> ₀₅								1.9
<i>S_x</i>								0.62

стебля, активизацию образования плодозлементов, повышение завязываемости коробочек [3], однако использование композиции флороксана с глицирризиновой кислотой показало более высокую эффективность действия *СРР* по показателям всхожести, роста и развития, а также по формированию плодозлементов хлопчатника.

Определение влияния ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 на растения баклажана. Полученные результаты представлены на рис. 3 и 4 и в табл. 4. Площадь листовой поверхности и содержание пластидных пигментов определяли на 7-е сут после опрыскивания растений. Было показано, что опрыскивание ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 достоверно оказывало бо́льший эффект: при обработке растений

баклажана композицией флороксан–ГК площадь листовой поверхности превышала контрольный вариант на 101, при обработке флороксаном – на 93.3% (рис. 3).

Исследование влияния стимуляторов роста на основе флороксана на физиологические показатели баклажана показало, что наибольшее содержание пигментов в его листьях наблюдали после опрыскивания водным раствором, полученным из ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 (рис. 4). При опрыскивании растений содержание хлорофилла *a* превышало контрольный вариант на 0.40 мг/л, хлорофилла *b* – на 0.17, суммы *a* и *b* – на 0.53 мг/л,

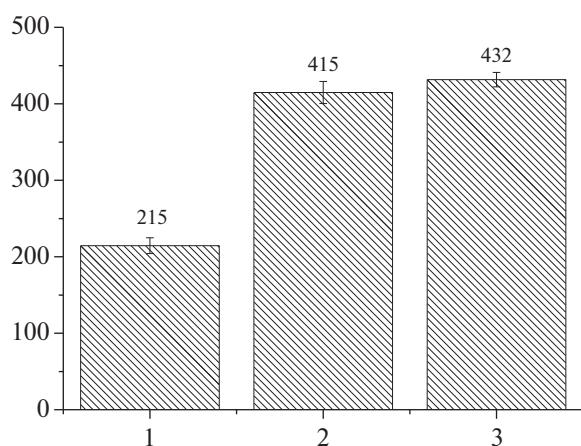
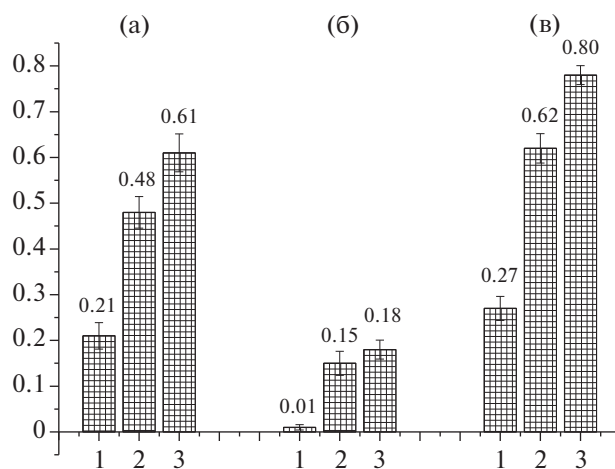
**Рис. 3.** Влияние опрыскивания растений баклажана сорта Шарапова F1 стимуляторами роста на основе флороксана на площадь листовой поверхности.**Рис. 4.** Влияние стимуляторов роста на основе флороксана на содержание фотосинтетических пигментов в листьях баклажана сорта Шарапова F1: (а) – хлорофилл *a*, (б) – хлорофилл *b*, (в) – сумма хлорофиллов *a* + *b*.

Таблица 4. Влияние стимуляторов роста на основе флороксана на рост и развитие растений баклажана сорта Ша-рапова F1

Вариант	Норма расхода, мг/га	Высота растений, см	Количество листьев, шт.	Количество бутонов, шт.
		на одно растение		
Контроль	Без обработки	35.6	5.6	2.7
Флороксан	30	53.7	7.8	4.6
ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9	300	55.5	10.1	5.3
HCP_{05}		0.82	1.0	1.1
S_x		0.27	0.33	0.37

а было также больше, чем в варианте с применением флороксана соответственно на 0.13, 0.03 и 0.18 мг/л.

Обработка растений баклажана ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 приводила к значительному биологическому эффекту (табл. 4), а именно: высота растений в опытном варианте с опрыскиванием раствором в среднем составляла 55.5 см, что было больше контроля на 55.9%, количество листьев (10.1 шт.) – больше контроля на 80.3%, количество бутонов (5.3 шт.) – на 96.3%. При опрыскивании раствором флороксана эти показатели составили 53.7 см, 7.8 шт. и 4.6 шт., что было больше контроля на 50.8, 39.3 и 70.4% соответственно.

Данные биологических испытаний ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 на баклажане подтвердили, что стимуляция ею роста растений в период вегетации активизировала процессы метаболизма, что приводило к повышению продуктивности растений. Биометрические учеты показали, что использование ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 оказало существенное влияние на рост главного стебля и количество плодоорганов баклажана.

Такой результат можно объяснить тем, что твердая дисперсия состава ФЛ : ГК = 1 : 9 при растворении в воде образует супрамолекулярный комплекс, обеспечивающий повышенную растворимость, биодоступность и абсорбцию (проникновение через растительные мембраны) флороксана, а следовательно, и общее повышение его биологической активности, как это было показано на примере ряда лекарственных веществ [19–21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, препарат в виде ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9, полученный в результате малоэнергетической, практически безотходной одностадийной твердофазной механохимической технологии, обладает стимулирующей рост растений активностью, превышающей активность

флороксана, основан на доступном отечественном сырье, экологически безопасен, стабилен при длительном хранении, хорошо растворим в воде и удобен в применении.

Предпосевное замачивание семян хлопчатника показало более высокую эффективность ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 по показателям всхожести, роста и развития хлопчатника, а также по формированию его плодоземелентов по сравнению с флороксаном.

Опрыскивание растений баклажана в период вегетации продемонстрировало лучшую стимуляцию роста растений ТД состава ФЛ : ГК = 1 : 9 по таким показателям, как площадь листовой поверхности, содержание хлорофилла, высота растений, количество листьев и бутонов по сравнению с флороксаном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чкаников Н.Д., Свиридов В.Д., Кадыров А.А., Спиридонов Ю.Я. Композиция для обработки семян, обладающая рострегулирующим действием: Пат. РФ № 2369094, опубл. 10.10.2009 // Б.И. 2009. № 28.
2. Власенко Н.Г., Бурлакова С.В., Халиков С.С., Федоровский О.Ю., Чкаников Н.Д. Флороксан как потенциальный компонент комплексных протравителей зерновых культур // Агрохимия. 2017. № 7. С. 49–54.
<https://doi.org/10.7868/S0002188117070079>
3. Курбанова Э.Р., Закирова Р.П., Спиридонов Ю.Я., Халиков С.С., Чкаников Н.Д. Влияние регулятора роста флороксан на рост и урожайность хлопчатника // Агрохимия. 2019. № 6. С. 27–33.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119060085>
4. Власенко Н.Г., Бурлакова С.В., Федоровский О.Ю., Чкаников Н.Д., Халиков С.С. Комплексный фунгицид на основе фениламинов и азолов для защиты семенного материала яровой пшеницы // Агрохимия. 2018. № 10. С. 40–45.
<https://doi.org/10.1134/S0002188118100149>
5. Власенко Н.Г., Бурлакова С.В., Чкаников Н.Д., Халиков С.С. Фунгицидный протравитель на основе азолов для обработки семян зерновых культур //

- Агрохимия. 2019. № 6. С. 44–49.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119020145>
6. Бурлакова С.В., Власенко Н.Г., Чкаников Н.Д., Халиков С.С. Влияние многокомпонентных протравителей на зараженность фитопатогенами посевного материала и фитоценоз яровой пшеницы // Агрохимия. 2020. № 5. С. 72–79.
<https://doi.org/10.31857/S000218812005004X>
 7. Халиков С.С., Чкаников Н.Д., Спиридонов Ю.Я., Глинушкин А.П. Новый препарат для предпосевной обработки семян с комплексной защитой от болезней и остатков гербицидов в почве // Агрохимия. 2016. № 6. С. 39–45.
 8. Федоровский О.Ю., Халиков С.С., Спиридонов Ю.Я., Чкаников Н.Д. Антидотная активность нового производного стимулятора роста растений флороксан по отношению к гербициду ряда сульфонилмочевин – метсульфуронметилу // Агрохимия. 2019. № 5. С. 29–34.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119050041>
 9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Колос, 2012. 351 с.
 10. Душкин А.В., Метелева Е.С., Чистяченко Ю.С., Халиков С.С. Механохимическое получение и свойства твердых дисперсий, образующих водорастворимые супрамолекулярные системы // Фундамент. исслед. 2013. № 1. Ч. 3. С. 741–749.
 11. Халиков С.С., Теплякова О.И., Власенко Н.Г., Халиков М.С., Евсеев В.И., Душкин А.В. Применение арабиногалактана для улучшения технологических и биологических свойств протравителей зерновых культур // Химия в интересах устойчив. развития. 2015. Т. 23. № 5. С. 591–599.
 12. Selyutina O., Apanasenko I., Khalikov S., Polyakov N.E. Natural poly- and oligosaccharides as novel delivery systems for plant protection compounds // J. Agr. Food Chem. 2017. V. 65 (31). P. 6582–6587.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02591>
 13. Khalikov S.S., Dushkin A.V. Strategies for solubility enhancement of anthelmintics (Review) // Pharm. Chem. J. 2020. V. 54 (5). P. 504–508.
<https://doi.org/10.1007/s11094-020-02229-4>
 14. Selyutina O.Yu., Apanasenko I.E., Kim A.V., Shelepova E.A., Khalikov S.S., Polyakov N.E. Spectroscopic and molecular dynamics characterization of glycyrrhizin membrane-modifying activity // Colloids Surf. B. 2016. V. 147. P. 459–466.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.08.037>
 15. Селютин О.Ю., Халиков С.С., Поляков Н.Э. Сравнение проникновения компонентов протравителя методом ядерного магнитного резонанса // Агрохимия. 2017. № 4. С. 90–93.
 16. Selyutina O.Yu., Apanasenko I.E., Shilov A.G., Khalikov S.S., Polyakov N.E. Effect of natural polysaccharides and oligosaccharides on the cell membrane permeability // Rus. Chem. Bull. 2017. № 1. P. 129–135.
<https://doi.org/10.1007/s11172-017-1710-2>
 17. Selyutina O.Y., Shelepova E.A., Paramonova E.D., Kichigina L.A., Khalikov S.S., Polyakov N.E. Glycyrrhizin-induced changes in phospholipid dynamics studied by 1H NMR and MD simulation // Arch. Biochem. Biophys. 2020. V. 686. Iss. 108368.
<https://doi.org/10.1016/j.abb.2020.108368>
 18. Толстиков Г.А., Балтина Л.А., Шульц Э.Э., Покровский А.Г. Глицирризиновая кислота // Биоорг. химия. 1997. Т. 23. № 9. С. 691–709.
 19. Khalikov S.S. Review: Solid dispersions of anthelmintics and plant protection preparations // Solids. 2021. V. 2 (1). P. 60–75.
<https://doi.org/10.3390/solids201000>
 20. Душкин А.В., Сунцова Л.П., Халиков С.С. Механохимическая технология для повышения растворимости лекарственных веществ // Фундамент. исслед.-я. 2013. № 1. Ч. 2. С. 448–455.
 21. Душкин А.В., Метелева Е.С., Хомиченко Н.Н., Власенко Н.Г., Теплякова О.И., Халиков М.С., Халиков С.С. Новый пестицидный препарат на основе комплексов тебуконазола и производных глицирризина // Усп. совр. естествознания. 2016. № 11. Ч. 2. С. 296–300.
<https://doi.org/10.17513/use.36227>

Efficiency of a Composition Based on the Growth Regulator Floroxan with Glycyrrhizic Acid in Growing Cotton and Eggplant

R. P. Zakirova^{b,##}, S. S. Khalikov^{a,#}, E. R. Kurbanova^b,
 S. M. Turaeva^b, and N. D. Chkanikov^a

^aA.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of RAS
 ul. Vavilova 28, Moscow 119991, Russia

^bAcad. S.Yu. Yunusov Institute of Chemistry of Plant Substances of Uzbekistan Academy of Sciences
 M. Ulugbek str. 77, Tashkent 100170, Republic of Uzbekistan

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

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

Mechanochemical modification of the substance of floroxan by the glycyrrhizic acid made it possible to increase the solubility of the preparation and expand the range and effectiveness of its action.

Key words: floroxan, plant growth regulator, cotton, eggplant, biological efficiency.

УДК 631.811.98:632.122.2

МОНТМОРИЛЛОНИТ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ СТИМУЛЯТОР РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ В ПОЧВЕ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ МЕТСУЛЬФУРОН-МЕТИЛОМ¹

© 2023 г. Н. Д. Чкаников^{1,*}, А. В. Пастухов¹,
В. А. Абубикеров², Г. С. Босак², А. П. Глинушкин²

¹Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН
119991, Москва, ул. Вавилова, 28, Россия

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

*E-mail: nik-chkan@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.09.2022 г.

После доработки 23.09.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В настоящее время широкое применение гербицидов в сельском хозяйстве создает серьезную проблему дальнейшего использования загрязненных почв для выращивания различных типов растений сельскохозяйственного назначения. Развивая исследования алюмосиликатов, как детоксикантов остатков гербицидов, содержащихся в почве, в настоящей работе изучено влияние монтмориллонита К-10 (МРТ) на вегетирующие растения ярового рапса и кукурузы. Показано, что внесение МРТ в почву перед посевом в невысоких дозах оказывало мощное стимулирующее действие на развитие растений, как в присутствии в почве остатков метсульфурон-метила, так и в отсутствии гербицида в почве. Дозы примененного МРТ составляли всего 100–200 кг/га, что создавало перспективу широкого применения монтмориллонитовых (бентонитовых) глин в растениеводстве.

Ключевые слова: сульфонилмочевины, почвы, фитотоксичность, монтмориллониты, яровой рапс, кукуруза.

DOI: 10.31857/S0002188123010039, **EDN:** VPPWRW

ВВЕДЕНИЕ

Систематическая разработка новых методов защиты посевов от остатков гербицидов в почве [1–4] позволила найти перспективный способ защиты посевов от остатков гербицидов сульфонилмочевинового ряда (метсульфурон-метила), основанный на заблаговременном внесении перед посевом в загрязненную фитотоксикантом почву невысоких доз (100–250 кг/га) цеолита (природного клиноптилолита марки ЦПС) [3, 4]. Экспозиция цеолита в почве в течение 6 нед перед посевом позволяла не только снять 25–30% угнетения растений ярового рапса, но и добиться существенного увеличения массы тест-растений. Очевидным недостатком этого метода является необходимость заблаговременного внесения цеолита в почву перед посевом. В настоящей работе, продолжая исследования алюмосиликатов, были достигнуты превосходные результаты при внесе-

нии детоксиканта непосредственно перед посевом. Для этого использовали невысокие дозы активированного монтмориллонита К-10.

Монтмориллонит (МРТ) — глинистый материал, относящийся к подклассу филлосиликатов, к группе смектитов. Главной особенностью монтмориллонита, обусловленной строением его кристаллической решетки, является способность к адсорбции различных ионов (в основном катионов), а также к ионному обмену. Наличие изоморфных замещений, огромная удельная поверхность (до 600–800 м²/г) и легкость проникновения ионов в межпакетное пространство обеспечивает значительную емкость катионного обмена монтмориллонита [5]. Монтмориллонит является одним из породообразующих минералов бентонитовых глин, которые расположены по всему миру. В России в настоящее время разрабатываются месторождение монтмориллонитовых глин Гарпеж (Кабардино-Балкария), Зырянское месторождение бентонитов (Урал), месторождение бентонитов “10-й Хутор” (Хакасия). Монтмориллонит — ценное полезное ископаемое с адсорбционным и омыляющим свойствами, которые с дав-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-05043), а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Таблица 1. Влияние монтмориллонита (МРТ) на рост тест-растений рапса сорта Ратник при применении гербицида (ЛИК ВНИИФ, 2022 г.)

Внесение в почву гербицида Зингер, СП — 14.02.2022 г.
 Внесение МРТ — 15.02.2022 г.
 Посев тест-культуры — 16.02.2022 г.
 Учет — 14.03.2022 г.

Вариант	Доза алюмо- силиката, кг/га	Доза гербицида Зингер, СП г/га	Надземная масса тест-растений, г						Изменение надземной массы тест-растений, % к контролю
			повторности					среднее	
			1	2	3	4	5		
МРТ	100	—	8.7	8.3	6.7	8.2	8.3	8.0	+77.8
		0.4	4.8	5.6	4.9	5.7	4.4	5.1	+13.3
	200	—	8.1	6.4	7.1	6.9	8.4	7.4	+64.4
		0.4	8.0	5.1	6.8	6.8	7.5	6.8	+51.1
Зингер, СП	—	0.4	3.2	2.6	2.9	2.8	3.0	2.9	—35.6
Контроль без МРТ и гербицида	—	—	4.5	4.3	4.5	4.3	4.7	4.5	0.0
HCP ₀₅								1.0	

Таблица 2. Влияние монтмориллонита (МРТ) в суспензионной форме на тест-растения кукурузы сорта Феномен (протравленные семена) (ЛИК ФГБНУ ВНИИФ, 2022 г.)

Внесение в почву гербицида Зингер, СП — 14.04.2022 г.
 Внесение МРТ — 15.04.2022 г.
 Посев тест-культуры — 16.04.2022 г.
 Учет — 04.05.2022 г.

Вариант	Доза алюмо- силиката, кг/га	Доза гербицида Зингер, СП г/га	Надземная масса тест-растений, г					средняя	Изменение над- земной массы тест-растений, % к контролю
			повторности						
			1	2	3	4	5		
МРТ	100	—	4.8	8.3	5.3	6.4	5.4	6.0	+66.7
		2.0	6.7	7.6	6.3	7.9	6.9	7.1	+97.2
	200	—	5.6	5.7	4.8	5.2	5.0	5.3	+47.2
		2.0	5.9	7.5	5.9	6.8	7.4	6.7	+86.1
Зингер, СП	—	2.0	3.1	3.2	3.0	2.9	2.4	2.9	—19.4
Контроль без МРТ и гербицида	—	—	4.3	3.2	3.0	3.6	4.1	3.6	0.0
HCP ₀₅								1.0	

них пор активно используют люди. В сельском хозяйстве бентонит эффективен при производстве комбикормов, в качестве подстилки для животных и для мелиорации почвы. Агрохимическим результатом взаимодействия бентонита с почвой является оптимизация ее питательного режима и увеличение урожайности основных сельскохозяйственных культур [6]. Например, оптимальная доза внесения бентонита под озимую пшеницу составляет 7.5 т/га. Такая обработка приводит к

увеличению урожайности на 15.1% [7]. Для повышения урожайности подсолнечника на 21.7% требовалась доза бентонита 10 т/га [8]. Таким образом, эффективность применения бентонитовых (монтмориллонитовых) глин в растениеводстве продемонстрирована для его высоких доз. Хозяйственное значение такого способа увеличения урожая существенно снижается за счет процедур, связанных с транспортировкой и внесением в почву такого количества бентонитовой глины.

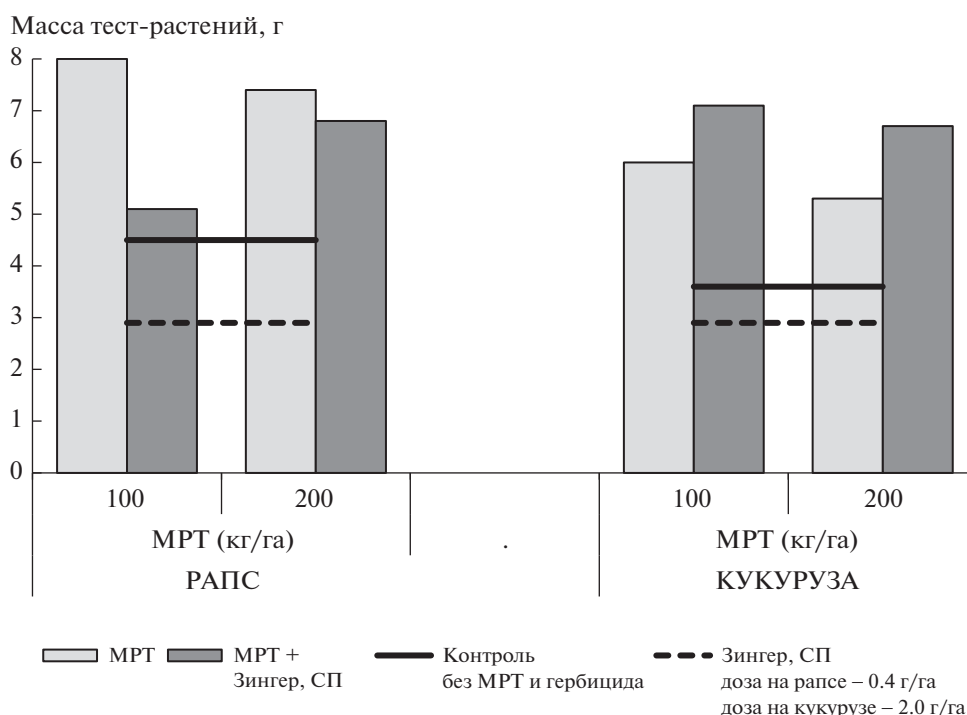


Рис. 1. Влияние активированного монтмориллонита (МРТ) на массу растений рапса и кукурузы в присутствии гербицида и без него.

Сведения о возможности детоксикации монтмориллонитом почв, загрязненных гербицидами отсутствуют. Цель работы — исследование эффективности монтмориллонита как стимулятора развития растений в почве, загрязненной метсульфурон-метилом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения эффективности применения невысоких количеств монтмориллонита (МРТ) для решения поставленных задач детоксикации почв, содержащих остатки сульфонилмочевиновых гербицидов, проведены эксперименты на вегетирующих растениях ярового рапса и кукурузы. При этом использован монтмориллонит К-10 (Aldrich).

Дерново-подзолистую почву обрабатывали с помощью лабораторного опрыскивателя гербицидом Зингер, СП (содержит в качестве действующего вещества 60% метсульфурон-метила) в дозе 0.4 г/га для тест-растений рапса и 2.0 г/га — для тест-растений кукурузы. Затем через 1 сут в обработанную гербицидом почву вносили суспензию монтмориллонита в воде в дозе 100 кг/га или 200 кг/га. В качестве контроля использовали чистую почву или почву с внесенным в нее гербицидом (Зингер, СП) (табл. 1, 2). Почву распределяли в вазоны вместимостью 600 г и проводили посев тест-растений. Повторность опыта пятикратная.

Выращивание тест-растений осуществляли в контролируемых условиях лаборатории искусственного климата (ЛИК) фирмы "Фетч" (ФРГ) во Всероссийском научно-исследовательском институте фитопатологии (ВНИИФ): при влажности воздуха в камере 70%, длительности дня 16 ч, ночи — 8 ч, освещенности днем 20 тыс. лк, температуре воздуха днем 25°C, ночью — 16°C; влажность почвы поддерживали на уровне 60% ПВ путем ежедневного полива каждого вегетационного сосуда водопроводной обессоленной водой. Через 18–26 сут надземную массу тест-растений взвешивали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента по изучению влияния МРТ на развитие растений ярового рапса в присутствии гербицида и без него представлены в табл. 1. При этом МРТ применяли в 2-х дозах 100 и 200 кг/га, как в присутствии гербицида, так и без него.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показал, что внесение в почву МРТ перед посевом в дозах 100 и 200 кг/га приводило не только к полной нейтрализации фитотоксического действия гербицида, которое составляло 35.6%, но и к стимуляции роста растений рапса (до 50% по массе в сравнении с контролем без внесения гербицида). В случае выращенных на чистой (не загрязнен-

ной гербицидами) почве растений внесение МРТ приводило к увеличению надземной части растений на 64–78%, т.е. наблюдали мощное ростостимулирующее действие.

Другой пример стимулирующего действия МРТ на растения продемонстрировал эксперимент на кукурузе (табл. 2) в условиях, аналогичных приведенным выше для рапса.

В этом случае увеличение массы растений составило почти 100% на фоне применения гербицида, которое приводило к подавлению растений на 19.4% в отсутствие МРТ. Полученные данные для рапса и кукурузы схематично представлены на рис. 1.

Следует отметить чрезвычайно низкую эффективную дозу МРТ (100–200 кг/га), что открывает новые возможности преодоления фитотоксического эффекта остатков гербицидов в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, продемонстрирована стимулирующая активность низких доз монтмориллонита К-10 в процессе вегетации растений ярового рапса и кукурузы. Этот эффект в полной мере проявлялся в присутствии фитотоксичных остатков сульфонилмочевин в почве. Практическая реализация этих исследований будет связана с дальнейшим изучением влияния различных типов бентонитовых глин на развитие растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чкаников Н.Д., Спиридонов Ю.Я., Халиков С.С., Музафаров А.М. Пути снижения фитотоксичности

остатков сульфонилмочевин в почве с помощью антидотов // *Агрохимия*. 2020. № 5. С. 103–113. <https://doi.org/10.31857/S0002188120050063>

2. Спиридонов Ю.Я., Чкаников Н.Д., Пастухов А.В., Ильин М.М. (мл.) Влияние цеолитов на развитие ярового рапса в присутствии остатков метсульфурон-метила // *Агрохимия*. 2021. № 10. С. 81–88. <https://doi.org/10.31857/S000218812110015X>
3. Спиридонов Ю.Я., Чкаников Н.Д., Пастухов А.В., Абубикеров В.А., Ильин М.М., Спиридонова И.Ю. Защита ярового рапса от фитотоксического действия остатков метсульфурон-метила с помощью цеолитов // *Агрохимия*. 2022. № 4. С. 40–45. <https://doi.org/10.31857/S0002188122040123>
4. Чкаников Н.Д., Спиридонов Ю.Я. Способ детоксикации почв, загрязненных гербицидами: Пат. 2759603, РФ // Б.И. 16.11.2021. № 32.
5. Montmorillonite Clay, IntechOpen 2021 Ed. F. Uddin. <https://doi.org/10.57772/intechopen.92926>
6. Козлов В.В., Куликова А.Х., Уромова И.П. Влияние высококремнистых пород (диатомита, цеолита и бентонитовой глины) на активность олиготрофного и автохронного пула дерново-подзолистого почвенного сообщества // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2019. № 96. С. 86–112. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-86-112>
7. Агафонов Е.В., Цыганков А.В., Турчин В.В., Громаков А.А. Применение бентонитовой глины под озимую пшеницу на темно-каштановой почве // *Агрохим. вестн.* 2013 № 3. С. 22–24.
8. Громаков А.А., Скуратов Н.С., Горячев В.П. Эффективность применения бентонитовой глины и минеральных удобрений под подсолнечник на черноземе южном // *Научн. журн. КубГАУ*. 2012. № 84(10). С. 1–10.

Montmorillonite as an Effective Stimulator of Plant Development in Soil Contaminated with Metsulfuron-Methyl

N. D. Chkanikov^{a, #}, A. V. Pastukhov^a, V. A. Abubikero^b,
G. S. Bosak^b, and A. P. Glinushkin^b

^aA.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the RAS
ul. Vavilova 28, Moscow 119991, Russia

^bAll-Russian Research Institute of Phytopathology
ul. Institute str., vlad. 5, Moscow region, Bolshye Vyazemy 143050, Russia

[#]E-mail: nik-chkan@yandex.ru

Currently, the widespread use of herbicides in agriculture creates a serious problem of further use of contaminated soils for growing various types of agricultural plants. Developing the research of aluminosilicates as detoxicants of herbicide residues contained in the soil, the effect of montmorillonite K-10 (MRT) on vegetative plants of spring rape and corn is studied in this work. It was shown that the introduction of MRT into the soil before sowing in low doses had a powerful stimulating effect on plant development, both in the presence of methsulfuron-methyl residues in the soil and in the absence of herbicide in the soil. The doses of the applied MRT were only 100–200 kg/ha, which created the prospect of widespread use of montmorillonite (bentonite) clays in crop production.

Key words: sulfonylureas, soils, phytotoxicity, montmorillonites, spring rape, corn,

УДК 632.4:634.11:634.1.047

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО БИОМА МОЛОДОГО ЯБЛОНЕВОГО САДА ИНТЕНСИВНОГО ТИПА

© 2023 г. Е. В. Бондарева^{1,*}, Л. Г. Серая¹, Г. Е. Ларина¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

*E-mail: BondarevaE.V@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Грибы являются одним из основных источников биотических индукторов иммунитета растений, но среди этой группы микроорганизмов отмечают и наибольшее число фитопатогенов. Проведены 2-летние исследования динамики состава и структуры грибного сообщества в почве и агрохимических характеристик почвы молодого яблоневого сада интенсивного типа. Изучение грибного пула в контроле (фон, без растений) показало, что содержание почвенных сапротрофов и целлюлозолитиков в 2 раза превышало обилие этих групп в корневой зоне молодой яблони. Продemonстрированы важность роли экссудатов растений для формирования микобиоты корневой зоны, ее участие в дифференциации почвенного микробного сообщества и формировании “фитогенной области”, где корневые выделения влияют на деятельность и распределение эколого-трофических групп грибов. В зоне интенсивного роста корней в слое 10–20 см почвы отмечено резкое уменьшение содержания макроэлементов (азота, фосфора, калия).

Ключевые слова: яблоня, интенсивный сад, грибы, микология, агрохимия.

DOI: 10.31857/S0002188123050046, **EDN:** URVNRU

ВВЕДЕНИЕ

Оценивая качество жизни человека на сегодняшний день, можно отметить, что на его здоровье в определенной степени влияют неправильное питание и обилие используемых лекарств. Для снижения нагрузки на организм и поддержания иммунитета человеку необходимо употреблять в пищу продукты, содержащие полный комплекс витаминов, минеральных веществ, углеводов, белков, пектиновых веществ и др. [1]. Основная задача современного садоводства – круглогодичное снабжение потребителей свежей продукцией, что является важным элементом продовольственной безопасности страны. В Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717, Указе Президента Российской Федерации от 21 июля 2016 г. описаны требования и условия для развития отрасли садоводства, в том числе интенсивного типа (<http://government.ru/docs>). Благодаря компактности садов интенсивного типа, они могут быть высажены в пригородных и

внутригородских территориях на небольших земельных участках. Плотная посадка деревьев и скороспелость повышают продуктивность с единицы площади, но при этом увеличивают риск и скорость распространения инфекций в саду.

Среди плодовых культур яблоня домашняя или культурная (*Malus domestica* L.) является одной из самых популярных в мире и в России [2]. Ее плоды богаты разными полезными соединениями и биологически активными веществами, необходимыми для рационального питания [3]. Много работ посвящено вопросам количественных показателей, которые лимитируют возделывание культуры яблони в разных регионах – свет, гидротермические, орографические и почвенные условия [4]. Усиление стресс-факторов приводит к ослаблению растений, поражению болезнями и вредителями, ухудшает приживаемость молодых растений и снижает жизнеспособность плодовых культур в целом. Одним из экологически безопасных и оправданных в долгосрочной перспективе подходов защиты растений является сохранение биоразнообразия в их корневой зоне. Это позволяет “укрепить” защитные механизмы растений и контролировать прорастание спор, скле-

роций и других структур фитопатогенных грибов с помощью выделений почвенных и ризосферных микроорганизмов или поддерживать фунгистазис почвы. Поддержание биоразнообразия способствует снижению инфекционного потенциала почвы и улучшению фитосанитарного состояния растений. Вопросы трансформации микобиоты корневой зоны саженцев плодового растения изучены недостаточно, в первую очередь из-за необходимости контроля множества факторов. Цель работы — анализ формирования структуры грибного сообщества в корневой зоне саженцев яблонь при посадке с открытой корневой системой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2019 г. на территории ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова был заложен молодой яблоневый сад по интенсивной технологии с искусственным поливом (GPS 55°42'28.5"N 37°31'24.7"E). Саженцы возрастом 3–5 лет сортов Фрегат и Голден Делишес были высажены с открытой корневой системой в почвенную смесь (грунт готовили на месте из смеси нескольких компонентов). Компоненты в составе почвенной смеси: песок, суглинок (нативная почва с места посадки) и перепревший компост (торфо-навозная смесь). После закладки сада на его территории ежегодно проводят агромероприятия: внесение основных удобрений и рыхление почвы между рядами для удаления сорной растительности.

Опытный участок относится к 1-й почвенно-климатической зоне подзолистых и дерново-подзолистых почв таежно-лесной области (КУ > 1.33, сумма температур теплого периода — 1600–2000°C). Погодные условия вегетационного периода 2019–2020 гг. были благоприятными для роста и развития семечковых плодовых культур. Не установлены существенные отличия температурного режима в летний период от среднееголетних данных (18°C): в разные годы наблюдений температура менялась от 17.0° до 18.4°C.

В 2019–2020 гг. были проведены микологические исследования качества почвы в корневой зоне молодых яблонь и между рядами растений. Опыт проводили в 4-х повторностях, 5 растений в каждой. Режим осадков и соответственно влажности во все годы наблюдений отличался дефицитом влаги, т.е. количество осадков было равно 22 мм в 2018 г., 21.7 мм — в 2019 г., 40.9 мм — в 2020 г. по сравнению со среднееголетним показателем (55 мм).

Систематично при помощи геосемплера отбирали образцы фоновой почвы в междурядьях

(фон) и из корневой зоны яблони с 4-х сторон каждого дерева. Общая высота почвенного керна была равна 30 см. КERN затем разделяли послойно от поверхности вглубь корневого кома с шагом 5–10 см.

Микробиологические исследования были проведены с применением классических лабораторных методов: обрастания комочков почвы на картофельно-сахарозном агаре (КСА) и посева из разведений почвенных суспензий на среду Чапека [5, 6]. Во все среды добавляли гентамицин для подавления роста бактерий. В специальном исследовании с применением комплекса методов [7] провели анализ готовой почвенной смеси на присутствие опасного для яблони фитопатогена из рода *Phytophthora*. Получен отрицательный результат, возбудитель фитофтороза не выявлен.

Инструментальный анализ агрохимических данных почвы проведен методами, традиционно принятыми в почвоведении [8]. Определены основные показатели — актуальная кислотность, содержание азота, фосфора, калия, органического углерода. Средние образцы готовили методом квадрата (ГОСТ 17.4.4.02-2017) [9].

Оценку биоразнообразия грибных сообществ в разных слоях почвы фона (Ф) и корневого кома (К) провели с помощью экологических индексов: Шеннона (S_{Φ} , S_K), описывающего разнообразие сообщества, Пиелу (P_{Φ} , P_K), характеризующего равномерность распределения относительной численности особей при данном количестве видов, и Симпсона (C_{Φ} , C_K), показывающего количественную меру доминирования.

Оценку сходства и различий структурного микробного ценоза оценивали с помощью коэффициента Жаккара (J_{Φ} , J_K), отображающего отношение числа видов, обнаруженных в обоих образцах одновременно, к числу видов, обнаруженных только в одном из них [10].

Математический анализ экспериментальных данных проводили с помощью функциональных возможностей программы MS Excel 2010 при уровне вероятности 0.95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Видовое богатство грибного сообщества в субстратах, используемых при закладке интенсивного сада. Классическими лабораторными методами были исследованы образцы готовой почвенной смеси для заполнения посадочных мест и исходных компонентов: песка, суглинка, компоста и оценено групповое богатство грибного сообщества (рис. 1). В песке была обильно представлена

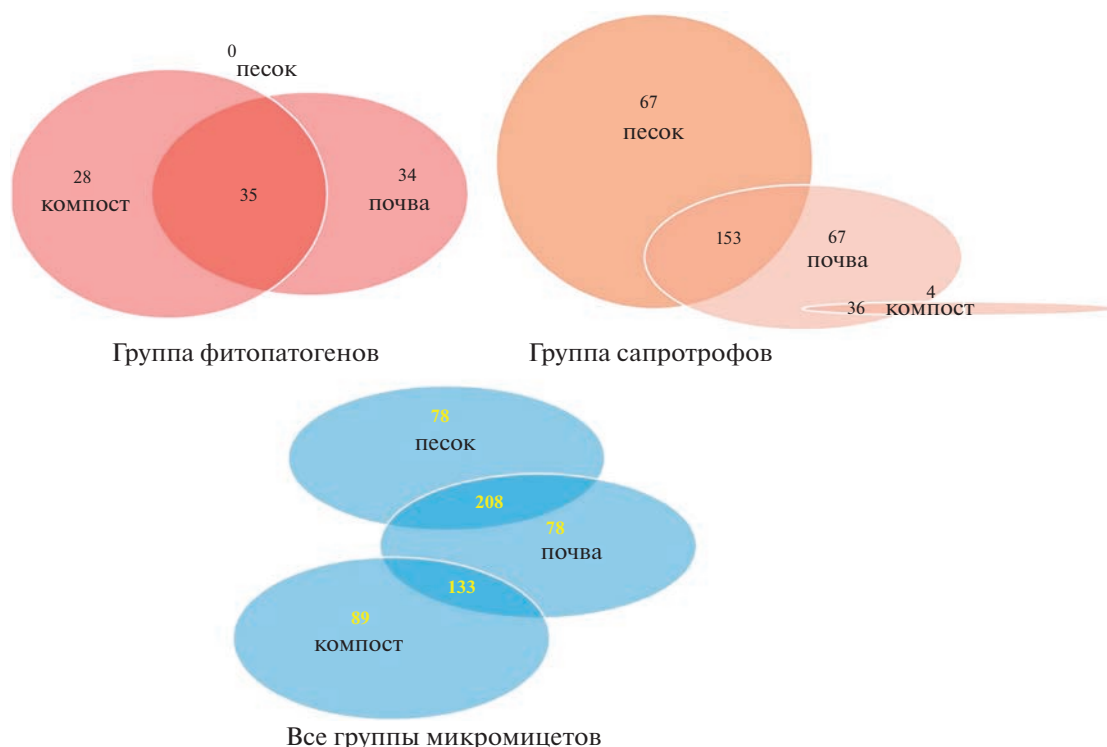


Рис. 1. Диаграмма Венна (Круги Эйлера), отражающая вклад разных групп микроорганизмов в состав микробиоценозов компонентов субстрата (высота фигуры характеризует вклад, числа — обилие).

группа почвенных сапротрофов и их было крайне мало в компосте. В почве и компосте определено высокое содержание фитопатогенных грибов, в отличие от песка, где они не были идентифицированы. Отметим высокое содержание сахаролитиков в суглинке (исходной почве места закладки сада). Отдельно можно отметить микромицета *Talaromyces flavus* (Klöcker) Stolk & Samson, который, по литературным данным, проявляет высокую антагонистическую активность в отношении возбудителя болезней увядания растений, и *Chaetomium globosum* Kunze, являющегося антагонистом многих фитопатогенных грибов рода *Cladosporium* [11, 12]. Группа грибов, обладающих микопаразитическими свойствами, представлена видами *Melanospora zamiae* Corda и *Clonostachys rosea* (Link) Schroers, Samuels, Seifert & W. Gams. В полученной почвенной смеси она была сформирована благодаря высокому содержанию этих видов во внесенном навозе. Высокое содержание фитопатогенных микромицетов и оомицетов было отмечено в суглинке, т.е. в почве, находившейся на месте закладки яблоневого сада, и также во внесенном компосте (торфо-навозной смеси).

Видовое богатство грибного сообщества готовой почвенной смеси, которую вносили в посадочную яму, в целом унаследовано от исходных

компонентов. В почвенной смеси через 2-е сут экспозиции определены различия в составе функциональных групп и в видовом разнообразии по сравнению с исходными компонентами (рис. 2). В почвенной смеси доминировали 2 группы (общий вклад 44%): фитопатогены из родов *Alternaria*, *Fusarium*, *Pythium*, *Cladosporium* и микопаразиты из родов *Melanospora* и *Clonostachys*. Высокое содержание фитопатогенов также зафиксировано в компосте (29%) — *Fusarium avenaceum*, *Fusarium oxysporum*, *Cladosporium herbarum*, *Cladosporium cladosporioides* и в суглинке (35%) — *Alternaria alternata*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani*, *Pythium* sp. Отметим, что некоторые виды из группы фитопатогенных грибов (*Fusarium avenaceum*, *Fusarium oxysporum*, *Pythium* sp., *Cladosporium herbarum*) не “перешли” из исходных компонентов в готовый субстрат и не были идентифицированы в нем после краткой экспозиции. По нашему мнению, значительную роль в ограничении развития микромицетов играли их “антагонисты” из родов *Chaetomium* и *Trichoderma*, а также микопаразитические грибы из родов *Clonostachys* и *Melanospora*. Подчеркнем, что внесенный объем пропагул данных грибов в получившейся почвенной смеси мог быть недостаточен

Таблица 1. Состав почвенного микробиома в молодом яблоневом саду интенсивного типа (2019–2020 гг.)

Группа	Название вида	Фон		Опыт		Индекс фон/опыт
		1-й год	2-й год	1-й год	2-й год	среднее
Сапротроф	<i>Microascus brevicaulis</i>	+	+	–	–	А
	<i>Purpureocillium lilacinum</i>	–	+	–	–	А
	<i>Talaromyces purpureogenus</i>	+	+	–	–	А
	<i>Wardomyces</i> sp.	–	+	–	–	А
	<i>Talaromyces flavus</i>	+	+	–	+	В
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	++	+	–	+	В
	<i>Penicillium</i> sp.	–	+	–	+	В
	<i>Phialophora</i> sp.	–	+	–	+	В
	<i>Geotrichum candidum</i>	–	+	–	+	В
	<i>Scedosporium aurantiacum</i>	+	+	+	+	В
	<i>Penicillium</i> sp.	+	–	+	+	В
	<i>Aspergillus terreus</i>	+	–	+	+	В
	<i>Cadaphora</i> sp.	+	–	+	+	В
	<i>Talaromyces</i> sp.	+	–	+	–	В
	<i>Acremonium</i> sp.	–	–	–	+	Б
	<i>Chaetomium globosum</i>	–	–	+	+	Б
	<i>Melanospora zamiae</i>	–	–	+	+	Б
	<i>Oidiodendron</i> sp.	–	–	+	+	Б
	<i>Paecilomyces</i> sp.	–	–	–	+	Б
	<i>Pseudogymnoascus pannorum</i>	–	–	++	+	Б
	<i>Scedosporium</i> sp.	–	–	–	+	Б
	<i>Tritirachium</i> sp.	–	–	–	+	Б
Сахаролитик	<i>Mucor circinelloides</i>	++	+	–	–	А
	<i>Asidia spinosa</i>	+	–	+	–	В
	<i>Mortierella</i> sp.	–	+	–	+	В
	<i>Mucor hiemalis</i>	–	–	+	+	Б
	<i>Rhizopus oryzae</i>	–	–	–	+	Б
Фитопатоген	<i>Alternaria</i> sp.	–	+	–	–	А
	<i>Botryotrichum</i> sp.	–	+	–	–	А
	<i>Fusarium solani</i>	+	+	–	–	А
	<i>Trichothecium roseum</i>	–	+	–	–	А
	<i>Sarocladium strictum</i>	+	+	–	+	В
	<i>Fusarium</i> sp.	–	+	+	+	В
	<i>Acrostalagmus luteoalbus</i>	+	–	–	+	В
	<i>Verticillium</i> sp.	–	+	+	+	В
	<i>Pythium</i> sp.	+	–	–	++	В
	<i>Alternaria alternata</i>	–	–	+	+	Б
	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	–	–	+	+	Б
	<i>Fusarium culmorum</i>	–	–	–	+	Б
	<i>Fusarium oxysporum</i>	–	–	–	+	Б
	<i>Graphium</i> sp.	–	–	+	+	Б
	<i>Humicola fuscoatra</i>	–	–	–	+	Б

Таблица 1. Окончание

Группа	Название вида	Фон		Опыт		Индекс фон/опыт
		1-й год	2-й год	1-й год	2-й год	среднее
	<i>Leptographium</i> sp.	—	—	—	+	Б
	<i>Monodictus</i> sp.	—	—	—	+	Б
	<i>Phoma</i> sp.	—	—	—	+	Б
	<i>Plectosphaerella cucumerina</i>	—	—	—	+	Б
	<i>Sporothrix like</i>	—	—	+	+	Б
Целлюлозолитик	<i>Trichoderma viride</i>	—	+	—	—	А
	<i>Acremonium murorum</i>	+	+	—	+	В
	<i>Trichoderma</i> sp.	—	+	+	—	В
	<i>Clonostachys rosea</i>	++	++	+	+	В
	<i>Trichoderma harzianum</i>	++	—	+	+	В
	<i>Metarhizium marquandii</i>	—	—	+	—	Б
	<i>Trichoderma koningii</i>	—	—	+	—	Б
экрисотроф	<i>Aspergillus flavus</i>	+	+	+	+	В
	<i>Aspergillus niger</i>	—	+	—	+	В
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	+	+	++	+	В
	<i>Dichotomopilus erectus</i>	—	+	+	+	В
	<i>Cephalotrichum</i> sp.	—	—	—	+	Б
	<i>Cephalotrichum stemonitis</i>	—	—	+	+	Б
энтомопатоген	<i>Metarhizium anisopliae</i>	+	+	—	—	А
	<i>Akanthomyces lecanii</i>	+	—	+	—	В
	<i>Sesquicillium</i> sp.	+	+	++	+	В
	<i>Arthrobotrys dactyloides</i>	—	—	—	+	Б
	<i>Lecanicillium</i> sp.	—	—	—	+	Б

Примечания. 1. + — частота встречаемости (ЧВ) = 33–67%, ++ — 68–100%, прочерк — не значимо или отсутствует. 2. А — есть только на фоне, Б — есть только в корневой зоне яблони, В — присутствуют в обоих вариантах (ячейки затенены).

для поддержания высокой конкурентоспособности относительно прочих грибов.

Эколого-трофическая структура грибов в почве разных участков интенсивного сада. По данным анализа динамики грибного сообщества в корневой зоне молодых яблонь и в почве междурядий в период 2019–2020 гг., определены изменения в составе эколого-трофических групп грибов и представленности отдельных видов (табл. 1). Установлено, что из 22 видов сапротрофов присутствовали на фоновом участке и в корневой зоне яблони 10 видов из родов *Aspergillus*, *Cadaphora*, *Geotrichum*, *Penicillium*, *Phialophora*, *Scedosporium*, *Talaromyces*; из 5 видов сахаролитиков — 2 вида из родов *Asidia* и *Mortierella*; из 20 видов фитопатогенов — 5 видов из родов *Sarocladium*, *Fusarium*, *Acrostalagmus*, *Verticillium*, *Pythium*; из 7 видов целлюлозолитиков — 4 вида из родов *Acremonium*, *Clonostachys*, *Trichoderma*; из 6 видов эккрисотро-

фов — 4 вида из родов *Aspergillus*, *Dichotomopilus*; из 5 видов энтомопатогенов — 2 вида из родов *Akanthomyces*, *Sesquicillium*.

В фоновой почве с глубиной увеличивалось влияние целлюлозолитических грибов родов *Clonostachys* и *Acremonium*, почвенных фитопатогенов — *Cylindrocarpon*, *Fusarium*, *Pythium*, типичных почвенных сапротрофов — *Acremonium*, *Aspergillus*, *Botryotrichum*, *Humicola*, *Penicillium*, *Tolypocladium*, *Verticillium*. В опытном варианте в корневой зоне саженцев яблони структура имела отличия от контроля. Было выделено <6% от всей выборки типичных почвенных сапротрофов из родов *Aspergillus*, *Humicola* и *Acremonium*.

Анализ данных 1-го и 2-го года роста растений позволил заключить, что в корневой зоне молодых яблонь сформировались эколого-трофические группы микроорганизмов, которые выпол-

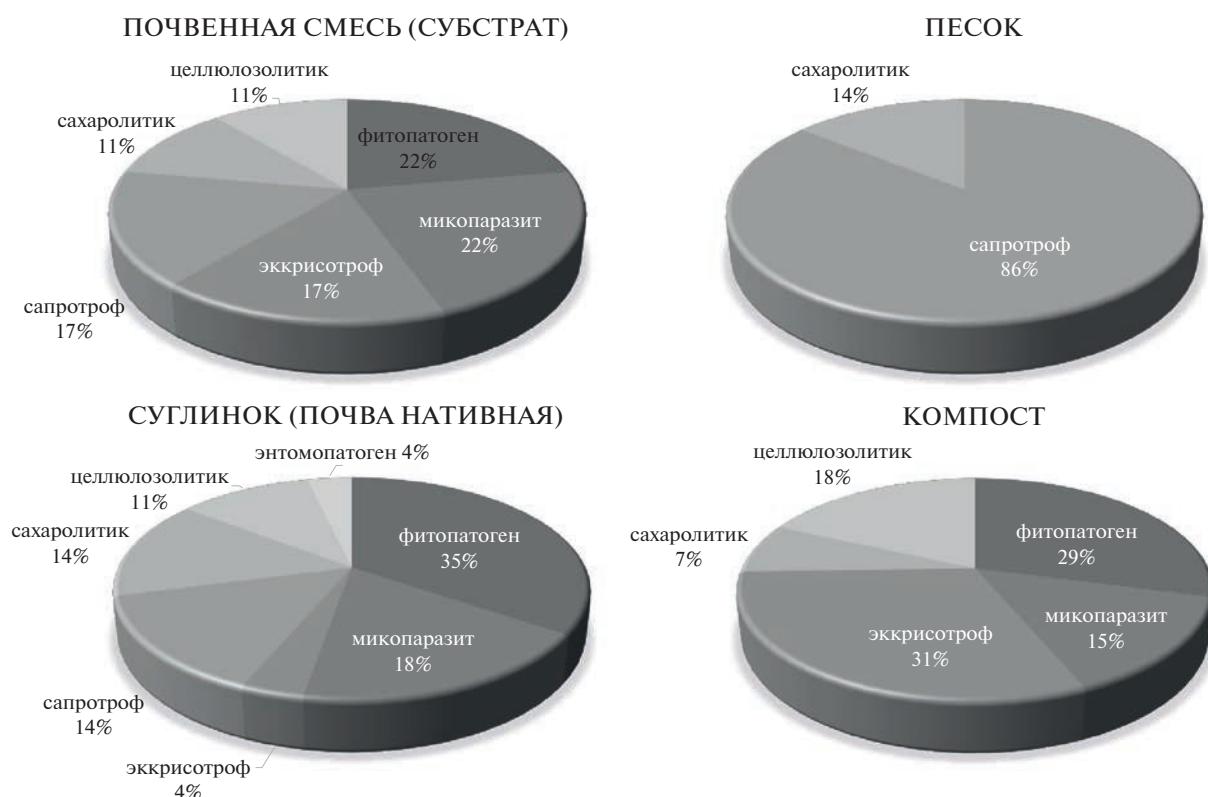


Рис. 2. Диаграммы распределения разных групп микроорганизмов в составе микробиоценоза субстрата и его отдельных компонентов (в скобках — вклад, %).

няют функцию редуцентов, минерализуют органические вещества и корневой отпад. В фоновой почве содержание почвенных сапротрофов было в 2 раза больше, чем в опытном варианте и равно $12 \pm 2\%$, в то время как в корневой зоне происходило активное развитие фитопатогенных грибов, и на 2-й год исследования появлялась группа нематофаговых грибов, представленная микромицетами рода *Arthrobotrys*. Данные хищные грибы активно развиваются в присутствии большого количества нематод, которые питаются обильным корневым опадом молодых растений на этапе их адаптации и приживаемости.

Изучение распределения микромицетов с увеличением глубины отбора проб почвы продемонстрировало уменьшение доли целлюлозолитиков с 35 до 23% в целом и, в частности, с 28 до 21% грибов-целлюлозолитиков из родов *Clonostachys* и *Trichoderma*. Одновременно в составе сообщества в слое 10–30 см увеличилось количество представителей фитопатогенных грибов из родов *Alternaria*, *Brachychaeta*, *Chaetomium*, *Coniothyrium*, *Graphium*, *Monodictus*, *Fusarium*, *Volutella*, *Pythium* по сравнению со слоем 5–10 см. В верхней части профиля в контроле идентифицированы копротрофные грибы из родов *Scedosporium*, *Melanospo-*

ra с долей встречаемости 5%, что является следствием использования перепревшего навоза КРС при создании почвенных смесей. В опытном варианте комплекс микроскопических грибов, встречаемый на поверхности листьев яблони (филлоплана), выделен как самостоятельная экологическая группа, которая включала микромицеты из родов *Alternaria*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Monilia*, *Monodictus*, *Torula*, *Volutella*.

Установлены достоверные различия для слоя 0–20 см в составе почвенного грибного сообщества между фоном и корневой зоной саженцев яблони, что подтвердила величина коэффициента Жаккара, равная $38 \pm 3\%$ при уровне значимости <0.05 . Наши данные подтвердили выводы из работ других авторов, где показано, что корневые выделения яблони активно влияют на условия роста разных эколого-трофических групп микроорганизмов в корневом коме [13, 14].

Экспериментально подтверждена неравномерность распределения грибных сообществ в зависимости от глубины почвенного слоя (рис. 3). Индекс Шеннона показал небольшие изменения разнообразия (нисходящая кривая) с ростом глубины на фоне ($S_{\phi} = 1.85–1.33$) по сравнению с

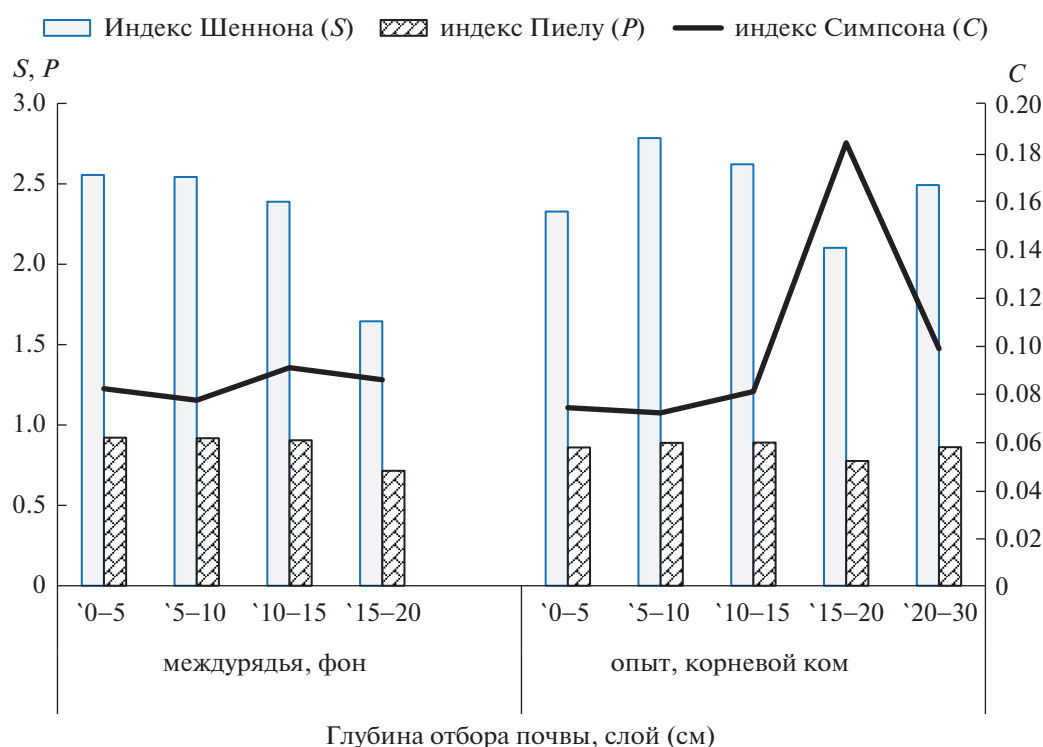


Рис. 3. Экологические индексы разнообразия грибных сообществ в разных слоях почвы молодого интенсивного яблоневого сада (2019–2020 гг.).

корневой зоной растений ($S_k = 1.89–1.17$), где кривая имела волнообразный характер. Индекс Пielу в фоновой почве показывал равномерное распределение микромитозов в слое 0–15 см ($P_\phi = 0.95$) и резкое понижение на границе слоев 10–15 см и 15–20 см ($P_\phi = 0.52$). Для всей глубины почвенного профиля в корневой зоне яблони наблюдали сглаженное распределение индекса Пielу ($P_k = 0.89–0.94$) и небольшое изменение на границе слоев 10–15 см и 15–20 см ($P_k = 0.75$), где расположена зона всасывания корня и основная масса корневых волосков.

Резкие скачки биоразнообразия по величине индекса Симпсона в слое 10–15 см определены в фоновой почве ($C_\phi = 0.09$) и в корневой зоне яблони в слое 15–20 см ($C_k = 0.19$). Полученные данные подтвердили усиление дифференциации микробного сообщества в слое активного роста и корневых выделений древесного растения.

Почвенные свойства на разных участках интенсивного сада. Агрохимические показатели почвы в вариантах фон и опыт существенно не отличались. В слое 0–30 см не отмечено существенного изменения содержания органического углерода (0.9–1.2%) и актуальной кислотности (pH_{H_2O} 6.5–6.7). Вертикальное распределение макроэлементов

в корневой зоне яблони резко уменьшалось на глубине 5–15 см: содержание азота, фосфора и калия соответственно менялось от 209 до 50 мг/кг, от 45 до 38 мг/кг, от 132 до 68 мг/кг. Видимо, на данной глубине находится зона поглощения корневой системы молодых растений, в которой корни активно всасывают влагу и растворенные питательные вещества. Это подтверждает и количество водорастворимых солей, которое было максимальным в верхней части корневого кома и равно 61–71 мг/кг по сравнению с нижней частью (43–52 мг/кг). В целом почвенные условия характеризовались как оптимальные для адаптации и приживаемости молодых саженцев яблони домашней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены 2-летние исследования изменения состава и структуры грибного сообщества в молодом яблоневом саду интенсивного типа в городской среде (на территории Ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова). Корневая система древесного растения в зоне питания корня с помощью экссудатов активно участвовала в дифференциации микробного сообщества и формировании специфического видового состава. В молодом яблоневом саду уже через 1 год после посадки

саженцев регистрировали изменение видового состава и структуры эколого-трофической грибных сообществ, а также развитие видов, несвойственных окружающим городским почвам. Показано, что состав сообщества микромицетов в почвенном слое 0–10 см обогащался за счет микобиоты филопланы – темноокрашенных экрисотрофов (представителей родов *Monodictus*, *Torula*, *Volutella*, *Cladosporium*), а в слое 10–20 см происходило увеличение присутствия фитопатогенных (*Alternaria*, *Chaetomium*, *Coniothyrium*, *Fusarium*, *Pythium*) и хищных группировок грибов (*Arthrobotrys*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Причко Т.Г., Дрофичева Н.В. Использование перспективных сортов яблок в технологии производства продуктов питания с функциональной значимостью // Пищ. пром-ть. 2015. № 1. С. 26–28.
2. Маркетинговое исследование: Рынок плодовых культур за 2015–2019 гг. Белгород: Инновационно-консультационный центр агропромышленного комплекса. 2020. 21 с.
3. Макарова Н.В., Валиулина Д.Ф. Анализ химического состава и антиоксидантных свойств яблок различных сортов // Пищ. пром-ть. 2013. № 3. С. 32–35.
4. Драгавцева И.А., Бандурко И.А., Ефимова И.Л. Лимитирующие факторы среды, определяющие продуктивность многолетних садовых насаждений // Новые технол. 2013. № 2. С. 110–114.
5. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 2005 г. 447 с.
6. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
7. Бондарева Е.В., Калембет И.Н. Сравнительный анализ классических лабораторных методов выделения представителей рода *Phytophthora* из почвы и растений // Аграрн. наука. 2019. Т. 1. С. 113–117.
8. Минева В.Г. Агрохимия. М.: Изд-во МГУ, 2004. 720 с.
9. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
10. Леонтьев Д.В. Флористический анализ в микологии: учеб. для студ. высш. уч. завед. Харьков, 2008. 110 с.
11. Naraghi L.H., Asghar R., Saeed Razavi M. Biocontrol agent *talaromyces flavus* stimulates the growth of cotton and potato // J. Plant Growth Regul. 2012. V. 31. <https://doi.org/10.1007/s00344-011-9256-2>
12. El-Dawy E.G., Mohamed Y.H. Morphological, molecular characterization, plant pathogenicity and biocontrol of *Cladosporium* complex groups associated with faba beans // Sci. Report. V. 11. Iss. 14183. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93123-w>
13. Joelle S., Enrico M., Trent N. Feed your friends: Do plant exudates shape the root microbiome? // Trend. Plant Sci. 2018. V. 23. Iss. 1. P. 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003>
14. Drake J.D., Giasson B., Kramer M.A., Phillips M., Finzi R. Stoichiometry constrains microbial response to root exclusion-insights from a model and a field experiment in a temperate forest // Biogeosci. Discuss. 2012. V. 9. P. 6899–6945. <https://doi.org/10.5194/bgd-9-6899-2012>

Research of Soil Biome of a Young Apple Orchard of Intensive Type

E. V. Bondareva^{a,*}, L. G. Seraya^a, and G. E. Larina^a

^aAll-Russian Research Institute of Phytopathology
ul. Institute, prop. 5, Moscow region, Odintsovsky district, r.p. Bolshie Vyazemy 143050, Russia

*E-mail: BondarevaE.V@yandex.ru

Fungi are one of the main sources of biotic inducers of plant immunity, but among this group of microorganisms, the largest number of phytopathogens is also noted. A two-year study was carried out on the dynamics of the composition and structure of the fungal community in the soil and the agrochemical characteristics of the soil of a young apple orchard of intensive type. The study of the fungi pool in the control (background, without plants) showed that the content of soil saprotrophs and cellulolytics was two times higher than the abundance of these groups in the root zone of a young apple tree. The importance of the role of plant exudates for the formation of the root zone mycobiota, its participation in the differentiation of the soil microbial community and the formation of the “phytogenic region” where root exudates affect the activity and distribution of ecological-trophic groups of fungi, is demonstrated. In the zone of intensive root growth in the 10–20 cm layer, a sharp decrease in the content of macroelements (nitrogen, phosphorus, potassium) was noted.

Key words: apple tree, intensive garden, micromycetes, mycology, agrochemistry.

УДК 631.878:631.41:631.46

ГУМИНОВЫЕ ПОЧВОМОДИФИКАТОРЫ ИЗ ТОРФА И УГЛЯ: ВЛИЯНИЕ НА ХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ПОЧВОСМЕСЕЙ¹

© 2023 г. А. А. Степанов¹, О. С. Якименко^{1,*}¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119992 Москва, Ленинские горы, 1., стр. 12, Россия

*E-mail: iakim@soil.msu.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Провели оценку воздействия почвенных модификаторов гуминовой природы (ГМ) на основе торфа и угля (препараты Торфогель и Углегель) на химические свойства, целлюлозолитическую активность и продуктивность модельных почвосмесей (искусственных почв) в условиях вегетационного эксперимента. В качестве естественной почвы сравнения использовали дерново-подзолистую окультуренную почву Московской обл. Показано, что увеличение доли обоих ГМ от 3 до 15% в составе почвосмесей закономерно улучшало их основные агрохимические показатели: содержание НРК и гумуса достигали категории высокое, сравнимое и превышающее таковые для естественной почвы. Значимые различия начинали проявляться при 5%-ном содержании Углегеля, и 7%-ном — Торфогеля. Обработка грунта гуминовыми почвомодификаторами стимулировала биологическую активность почвосмесей, а также рост и развитие растений. Все вышеуказанные тенденции были выражены значительно отчетливей при обработке Углегелем по сравнению с Торфогелем, что объясняется генезисом и свойствами органического вещества биополимеров. Результаты работы могут быть использованы для создания стабильных и продуктивных искусственных грунтов.

Ключевые слова: гуминовые удобрения, искусственные почвы, химические свойства почв, гумус, урожайность, биологическая активность.

DOI: 10.31857/S0002188123050095, **EDN:** USLIZJ

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования в области экологического земледелия и охраны окружающей среды диктуют необходимость применения в сельском хозяйстве и ремедиационных технологиях экологически чистых и безопасных природных веществ. Одним из наиболее перспективных приемов является использование препаратов на основе природных биополимеров — гуминовых веществ (ГВ). Являясь гетерофункциональными гидрофильными и амфифильными полиэлектролитами, ГВ при внесении в почву способны оптимизировать ее водный режим, стабилизировать почвенную структуру, предотвращать вынос питательных элементов и препятствовать водной и ветровой эрозии [1–4]. В связи с этим в настоящее время многие промышленные компании производят и предлагают на рынке линейку продуктов на основе природных ГВ из различного

органического сырья для их применения в качестве компонента искусственных почвогрунтов, которые могут быть использованы в городском озеленении, тепличном хозяйстве и т.п.

Эффективность таких инновационных продуктов на основе биополимеров различна. Показано их положительное воздействие на урожайность сельскохозяйственных культур [5–10], в качестве почвенных структурообразователей [11–14] и агентов для ремедиации загрязненных почв [15–19]. Тем не менее, закономерности влияния почвомодификаторов на основе ГВ в зависимости как от их природы и особенностей рецептуры, так и от свойств почв, пока не установлены.

Основные рецептуры получения гуминовых продуктов из органического сырья — твердофазная экстракция, щелочная экстракция, кавитация. Химическая модификация структуры ГВ в процессе их промышленного выделения из твердых каустобиолитов, как правило, приводит к увеличению количества функциональных групп,

¹ Работа выполнена в рамках госзадания 121040800154-8.

Таблица 1. Химический состав гуминовых модификаторов

Показатель	Торфогель	Углегель
рН	6.25	6.87
Влажность, %	73.7	81.6
Сухое вещество, %	26.2	18.4
Зольность, % к сухому веществу	37.1	6.9
Органическое вещество, % к сухому веществу	54.7	80.0
Гуминовые кислоты, % к сухому веществу	21.1	76.1
Гуминовые кислоты, % к <i>ОВ</i>	39	95
Фульвокислоты, % к сухому веществу	10.7	3.6
Фульвокислоты, % к <i>ОВ</i>	20	5

повышению растворимости гуминовых комплексов с металлами и другим изменениям свойств ГВ по сравнению с выделенными лабораторными способами [20]. Однако при одной и той же технологии принципиальное значение имеет генезис органического сырья. Ранее показано, что состав гуминовых продуктов из торфа и угля в значительной степени наследует черты, свойственные исходному сырьевому источнику, несмотря на технологические особенности производства [21–23]. Для органического вещества (*ОВ*) препаратов из торфов по сравнению с угольными характерно более низкое содержание углерода и высокое — азота и кислорода, более низкая ароматичность и обогащенность кислыми функциональными группами, алифатическими и углеводными фрагментами. В составе *ОВ* гуминовых продуктов, как правило, доминируют гуминовые кислоты (*ГК*). Однако некоторые гуминовые продукты (преимущественно из торфа, сапропеля и органических отходов) содержат до 91% веществ кислоторастворимой фракции (фульвокислот, аминокислот, углеводов, низкомолекулярных карбоновых кислот) [24–26]. Показано наличие биологически активных и гормоноподобных веществ [27–29], что во многом обуславливает их более высокую биостимулирующую активность по сравнению с препаратами из углей.

Эти факторы во многом объясняют неодинаковую эффективность гуминовых продуктов на основе угля и торфа при использовании их в качестве почвенных кондиционеров и биостимуляторов. В целом препараты из угля, обогащенные *ГК* с высокой степенью полимеризации ароматического ядра и большим количеством функциональных групп, способствуют формированию

почвенных агрегатов, увеличению емкости катионного обмена, доступности элементов питания и стимулированию биологической активности почв. В препаратах из торфа эти эффекты обычно выражены слабее, но за счет наличия биологически активных веществ в составе кислоторастворимой фракции они оказывают более выраженное воздействие в качестве стимуляторов роста растений.

Понимание механизмов взаимодействия почв и почвоподобных субстратов с инновационными продуктами на основе биополимеров позволит оптимизировать водно-физические и химические свойства деградированных почв, а также разработать теоретические и прикладные основы создания плодородных почвосмесей на основе геологических пород, строительных грунтов, что является актуальной фундаментально-научной и прикладной задачей.

Цель работы — оценка возможностей использования природных биополимеров на основе гуминовых веществ из торфа и угля в качестве почвенных модификаторов для создания плодородных почвосмесей. Ранее нами было изучено влияние гуминовых модификаторов (*ГМ*) на агрегатный состав почвосмесей [13]. В задачи данной работы входило изучение влияния тех же *ГМ* на химические свойства, продуктивность и биологическую активность почвосмесей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы почвенные модификаторы гуминовой природы — гуминовые модификаторы (*ГМ*) Торфогель и Углегель, разработанные и производимые компанией ООО “Биохим Технологии” (Москва, Россия) по оригинальной технологии из торфа и угля соответственно. Препараты представляют собой гелеобразную массу с влажностью 74–82% и высоким содержанием органического вещества: 55 и 80% для Торфогеля и Уггеля соответственно (табл. 1). В свою очередь, *ОВ* препаратов представлено комплексом гуминовых веществ с преобладанием гуминовых кислот в препарате из угля (95% от *ОВ*) и сбалансированным сочетанием гуминовых кислот (*ГК*) и фульвокислот (*ФК*) в препарате из торфа (39% *ГК* и 20% *ФК*). Содержание *ОВ* в препаратах определяли методом бихроматного окисления по Тюрину; содержание *ГК* и *ФК* — в 0.1 н. NaOH-вытяжке по Тюрину.

Почвосмеси готовили путем смешивания в определенных пропорциях неструктурного и малоплодородного среднесуглинистого грунта (элювиальный горизонт дерново-подзолистой

почвы, отобранный на территории ОПЭЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, “Чашниково”, Московская обл.) с гуминовыми модификаторами Торфогель или Углегель. Навески грунта помещали в объемный сосуд, добавляли соответствующие аликвоты ГМ и перемешивали с помощью мешалки “EIRICH” в течение 5 мин при 600 об./мин. Содержание ГМ в смесях составляло 0, 3, 5, 7, 9, 13 и 15% к массе исходного грунта.

Дальнейшие исследования проводили в условиях модельного вегетационного эксперимента с различными вариантами почвосмесей. На дно вегетационных сосудов (объем 0.6 л) помещали дренаж (3 см песка). Сосуды наполняли почвосмесями и проводили посев семян озимой пшеницы *Triticum aestivum* сорта Юка. На время наблюдений сосуды помещали в вегетационную камеру ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $W = 70\%$). Полив растений проводили ежедневно в течение всего времени эксперимента. Через 30 сут вегетации проводили укос и учет биомассы. Почву извлекали из сосудов, высушивали до воздушно-сухого состояния, отбирали репрезентативные пробы и определяли ряд показателей: pH в водной и солевой суспензии, емкость катионного обмена по Бобко–Аскинази, содержание гумуса — по Тюрину, отношение $C_{ГК} : C_{ФК}$ в 0.1 н. NaOH-вытяжке, содержание общего азота — по Кьельдалю на приборе Kjeltec-1020, доступных форм калия и фосфора — по Кирсанову.

Общую биологическую активность почвосмесей оценивали аппликационным методом по интенсивности разложения целлюлозы (по Звягинцеву). Полосу стерилизованной льняной ткани (10 × 50 см) помещали в почву на глубину 2 см перед посевом семян. Через 30 сут полотно извлекали, промывали, просушивали и взвешивали. Интенсивность разложения целлюлозы оценивали по убыли массы полотна (%), используя следующую шкалу: очень слабая <10, слабая 10–30, средняя 30–50, сильная 50–80 и очень сильная >80 [30].

Для сравнительной оценки свойств полученных почвосмесей (искусственных почв) со свойствами почвы, сформированной в естественных условиях, использовали верхний горизонт окультуренной дерново-подзолистой почвы Московской обл. (дерново-подзолистая культурная среднесуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых красно-бурой суглинистой мореной [31]). В почве сравнения проводили все те же анализы, что и в почвосмесях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходный почвогрунт характеризовался кислой реакцией среды, крайне низкой обеспечен-

ностью гумусом и доступными формами калия и фосфора (табл. 2, 3). Увеличение доли обоих ГМ в составе почвосмесей закономерно улучшало их основные агрохимические показатели по сравнению с исходным грунтом. Величина pH возрастала до 6.9–7.5, а обеспеченность доступными формами фосфора и калия достигала высокой и очень высокой степени (табл. 2). Также наблюдали закономерное увеличение емкости катионного обмена почвосмесей (до 33–37 мг-экв/100 г), что очевидно связано с увеличением содержания гумуса, а, следовательно, и увеличением обменных позиций в почвенном-поглощающем комплексе. Указанные эффекты значительно сильнее были выражены при обработке препаратом на основе угля по сравнению с препаратом из торфа. В целом агрохимические показатели почвосмесей приближались к таковым почвы сравнения при содержании Углегеля 3–5% и Торфогеля — 5–7%.

Особенно было выражено воздействие ГМ на показатели гумусного состояния почвосмесей (табл. 3, рис. 1). Исходный почвогрунт содержал крайне низкие количества гумуса и общего азота. Его обогащение гуминовыми веществами в составе ГМ привело к формированию высокогумусных почвосмесей. При этом Углегель, являясь более концентрированным и обогащенным ГК препаратом по сравнению с Торфогелем, оказывал значительно более сильное воздействие. Например, при одинаковых дозах ГМ содержание гумуса и доля ГК в его составе при обработке Углегелем примерно в 2 раза превышали таковые для вариантов с Торфогелем. Расширение отношения $C_{ГК} : C_{ФК}$ при возрастающих дозах ГМ демонстрировало ту же тенденцию. При этом обогащенность гумуса азотом по показателю $C : N$ оставалась низкой (12–18).

По показателям гумусного состояния наиболее сбалансированными и приближенными к естественной почве сравнения (2.62% гумуса, $C_{ГК} : C_{ФК} = 0.7$, $C_{ГК} : C_{общ} = 0.43$) составами, вероятно, можно считать смеси с 5%-ным содержанием Углегеля и 7–9%-ным — Торфогеля с минимальным соотношением $C : N$ и величиной $C_{ГК} : C_{ФК}$, близкой к единице.

ГМ оказывали также положительное влияние на активность микробного сообщества в исследованных почвосмесях (табл. 4). Интенсивность разложения целлюлозы в почве определяется совместным действием нескольких факторов, в том числе количеством поступающего органического вещества и доступностью источников азотного питания. В соответствии с количеством поступившего органического вещества биологическая

Таблица 2. Некоторые химические свойства почвосмесей на основе Торфогеля и Углегеля и почвы сравнения

Показатель	Варианты/содержание модификатора, %							Почва сравнения
	0	3	5	7	9	13	15	
Торфогель								
pH _{H₂O}	4.9	5.9	5.8	5.9	6.2	6.3	6.9	5.9
pH _{KCl}	н.о.*	4.9	5.0	5.0	5.2	5.5	5.7	5.1
ЕКО, мг-экв/100 г почвы	н.о.	11	12	20	24	29	33	8
N _{общ} , %	0.03	0.05	0.09	0.17	0.21	0.23	0.29	0.09
K ₂ O, мг/100 г почвы	0.02	11.1	12.3	15.2	19.8	21.4	25	13.2
P ₂ O ₅ , мг/100 г почвы	0.01	10.8	11.0	14.5	20.2	22.2	26.2	12.1
Углегель								
pH _{H₂O}	4.9	5.8	6.2	6.3	7.1	7.3	7.5	5.9
pH _{KCl}	н.о.	5.0	5.2	5.5	6.0	6.4	6.7	5.1
ЕКО, мг-экв/100 г почвы	н.о.	13	22	26	32	36	37	8
N _{общ} , %	0.03	0.09	0.19	0.20	0.28	0.34	0.38	0.09
K ₂ O, мг/100 г почвы	0.02	13.0	19.2	20.5	24.2	32.7	34.0	13.2
P ₂ O ₅ , мг/100 г почвы	0.01	11.9	20.0	22.8	23.5	31.5	32.1	12.1

*н.о. — не определяли. То же в табл. 3.

Таблица 3. Показатели гумусного состояния почвосмесей на основе Торфогеля и Углегеля и почвы сравнения

Показатель	Варианты /содержание модификатора, %							Почва сравнения
	0	3	5	7	9	13	15	
Торфогель								
Гумус, %	0.16	1.52	2.3	3.42	4.42	6.15	7.0	2.62
C : N	3.3	18	15	12	12	16	14	17
C _{ГК} , % к почве	н.о.	0.63	1.01	1.48	1.90	2.74	3.16	0.61
C _{ГК} , % к C _{общ}	н.о.	41.6	45.9	43.3	43.0	44.6	45.2	0.43
Углегель								
Гумус, %	0.16	2.7	4.31	6.04	7.72	10.6	12.0	2.62
C : N	3.3	17	13	18	16	18	18	17
C _{ГК} , % к почве	н.о.	2.3	3.8	5.3	6.9	9.9	11.4	0.61
C _{ГК} , % к C _{общ}	н.о.	84.5	88.3	88.2	76.1	93.1	94.8	0.43

Таблица 4. Целлюлозолитическая активность почвосмесей

Содержание модификатора, %	Интенсивность разрушения льняной ткани			
	Торфогель		Углегель	
	%	степень	%	степень
3	12.9	слабая	35.6	средняя
5	19.1	слабая	47.4	средняя
7	33.8	средняя	55.8	сильная
9	46.0	средняя	68.6	сильная
13	54.7	сильная	82.6	очень сильная
15	69.8	сильная	85.8	очень сильная

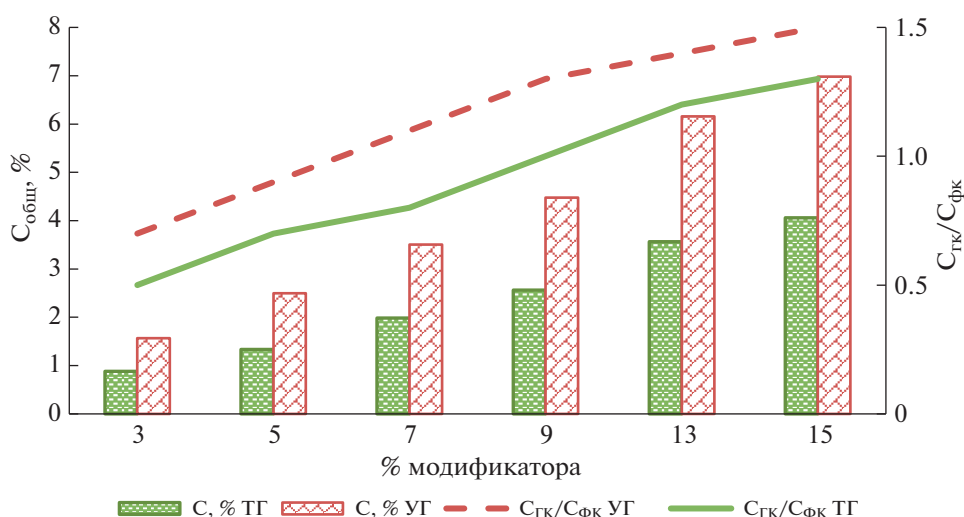


Рис. 1. Влияние различных доз Торфогеля и Углегеля на содержание общего углерода и величину соотношения $C_{ГК} : C_{ФК}$ в почвосмесях.

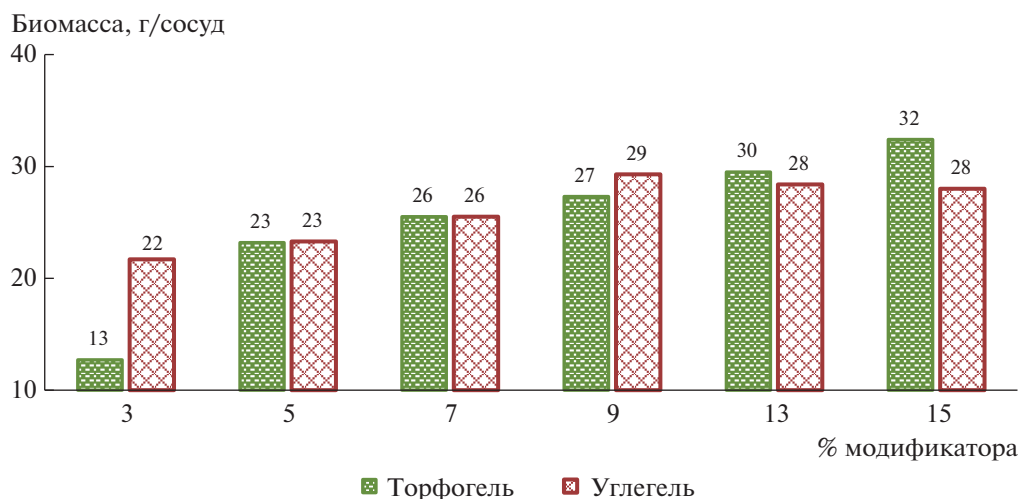


Рис. 2. Влияние различных доз Торфогеля и Углегеля на воздушно-сухую биомассу пшеницы в вегетационном опыте на почвосмесях.

активность почвосмесей возрастала с дозой внесения ГМ от слабой до сильной при обработке Торфогелем и от средней до очень сильной — Углегелем. Почва сравнения характеризовалась высокой степенью биологической активности (интенсивность разрушения ткани составила 52.8%), и почвосмеси достигали сходного уровня биологической активности при содержании Торфогеля — 13 и Углегеля — 7%.

Биологическая продуктивность (плодородие) исследованных почвосмесей повышалась с увеличением доли обоих ГМ в их составе (рис. 2). При этом различия между препаратами по показателю прироста биомассы показывали иную тенденцию, чем показатели химического состояния

и биологической активности почвосмесей. При внесении Торфогеля прибавка биомассы линейно возрастала с увеличением дозы. Обработка Углегелем обеспечивала прирост такой же биомассы тест-культуры, как и почва сравнения (22 г/сосуд), уже при минимальной дозе 3%, достигая максимума при содержании модификатора 9%, но более высокие дозы не приводили к дальнейшему увеличению продуктивности тест-культуры.

Эти данные могут свидетельствовать о том, что в целом Торфогель оказался более эффективным биостимулятором по сравнению с Углегелем, несмотря на более выраженное воздействие последнего на агрохимические показатели, показатели гумусного состояния и целлюлозолитическую ак-

тивность. Вероятно, решающее значение имело не высокое содержание в препарате ГК, а сбалансированное сочетание ГК и ФК, поскольку последние более активны в качестве биостимуляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученные почвомодификаторы на основе природных биополимеров — гуминовых веществ — препараты Торфогель и Углегель оказывали существенное положительное влияние на агрохимические свойства почвосмесей, а также их плодородие и биологическую активность.

Наиболее существенные, кардинальные изменения происходили со свойствами почвосмесей при достижении содержания органического вещества 6% и больше. Значимые различия начинали проявляться при 5%-ном содержании Углегиеля, и 7%-ном — Торфогеля, а оптимальными составами можно считать содержание ГМ 13–15% для почвосмесей на основе Торфогеля и 7–13% — на основе Углегиеля.

При этом генезис *ОВ* ГМ играл решающую роль: практически полностью состоящий из ГК Углегель оказывал более существенное воздействие на гумусное состояние и агрохимические показатели почвосмесей, тогда при обработке обогащенным ФК Торфогелем изменения происходили более плавно, но ростстимулирующий эффект на растения был выражен более отчетливо.

Результаты анализов почвенных смесей на основе комплексов гуминовых почвомодификаторов Торфогель и Углегель свидетельствовали о том, что исследованные почвенные смеси были близкими по своим свойствам (запасам питательных элементов, качеству и содержанию гумуса, биологической активности, плодородию) к естественным высокогумусированным почвам.

Авторы благодарны компании ООО “Биохим Технологии” (Москва, Россия) за предоставление образцов гуминовых почвомодификаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов В.В., Панова И.Г., Шульга П.С., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. Противозерозивные свойства чернозема, обработанного полиэлектrolитными комплексами на основе гуматов калия // *Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы*. 2019. С. 503–507.
2. Панова И.Г., Хайдапова Д.Д., Ильясов Л.О., Киушов И.И., Умарова А.Б., Сыбачин А.В., Ярославов А.А. Полиэлектrolитные комплексы гуматов калия и поли(диаллилдиметиламмоний хлорида) для закрепления песчаного грунта // *Высокомол. соед. Сер. Б*. 2019. Т. 61. № 6. С. 1–6.
3. Bezuglova O., Klimenko A. Application of humic substances in agricultural industry // *Agronomy*. 2022. Т. 12. № 3. С. 584.
4. Jindo K.K., Olivares, F.L., Malcher, D.J.D.P., Sánchez-Monedero, M.A., Kempenaar, C., Canellas, L.P. From lab to field: Role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent // *Front. Plant Sci.* 2020. Т. 11. С. 426.
5. Безуглова О.С., Полиенко Е.А. Применение гуминовых препаратов под картофель и озимую пшеницу // *Пробл. агрохим. и экол.* 2011. № 4. С. 29–32.
6. Степанов А.А., Якименко О.С., Госс Д.Д., Смирнова М.Е. Изучение эффективности гуминового удобрения ЭДАГУМ® СМ как стимулятора роста и мелиоранта в вегетационном и мелкоделяночном опытах с пшеницей // *Агрохимия*. 2018. № 6. С. 36–43.
7. Якименко О.С. Применение гуминовых продуктов в РФ: результаты полевых опытов (обзор литературы) // *Живые и биокосн. сист.* 2016. № 18. <http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-4>
8. Turgay O.C., Karaca A., Unver S., Tamer N. Effects of coal-derived humic substance on some soil properties and bread wheat yield // *Com. Soil Sci. Plant Anal.* 2011. V. 42. P. 1050–1070.
9. Yuan Y., Gai S., Tang C., Jin Y., Cheng K., Antonietti M., Yang, F. Artificial humic acid improves maize growth and soil phosphorus utilization efficiency // *Appl. Soil Ecol.* 2022. Т. 179. С. 104587.
10. Olk D.C., Dinnes D.L., Callaway C.R. Maize growth responses to a humic product in Iowa production fields: An extensive approach // *Front. Plant Sci.* 2021. V. 12. e778603.
11. Ли С.П., Прохоренко В.А., Худайбергенова Б.М., Жорбекова Ш.Ж. Структурирование солонцеватой сероземно-луговой почвы гидрогелями гуминовых препаратов // *Пробл. агрохим. и экол.* 2015. № 4. С. 45–50.
12. Лыхман В.А., Полиенко Е.А., Дубинина М.Н., Поволоцкая Ю.С., Безуглова О.С. Эффективность гуминового препарата как структурообразователя при выращивании озимой пшеницы в Ростовской области // *Изв. Оренбург. ГАУ*. 2019. № 4 (78). С. 54–58.
13. Степанов А.А., Якименко О.С., Шульга П.С. Эффективность действия гуминовых биополимеров из торфа и угля при восстановлении почвенной структуры // *J. Agricult. Environ.* 2022. № 3 (23). С. 1–6.
14. Якименко О.С., Грузденко Д.А., Степанов А.А., Бутылкина М.А., Киушов А.А., Панова И.Г. Полиэлектrolиты для конструирования искусственных почв // *Высокомол. соед. Сер. С*. 2021. Т. 63. № 2. С. 245–252.
15. Степанов А.А., Якименко О.С. Ремедиация загрязненных городских почв с применением гуминовых препаратов // *Живые и биокосн. сист.* 2016. № 18. <http://www.jbks.ru/archive/issue-18/article-5>
16. Степанов А.А., Шульга П.С., Госс Д.Д., Смирнова М.Е. Применение природных гуматов для ремедиации загрязненных городских почв и стимули-

- рования роста растений // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 30–34.
17. Степанов А.А., Салимгареева О.А., Манцевич С.И. “Антистрессовое действие” гуминовых препаратов при возделывании с.-х. культур и городском озеленении // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Изд-во МГУ, 2018. С. 134–135.
 18. Трегубова П.Н., Копчик Г.Н., Степанов А.А., Степанов А.А., Корнеева М.Ю., Куприянова Ю.В. Влияние гуминовых препаратов на свойства деградированных почв техногенных пустошей // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. № 97. С. 129–149.
 19. Pukalchik M., Panova M., Karpukhin M., Yakimenko O., Kydraliev K., Terekhova V. Using humic products as amendments to restore Zn and Pb polluted soil: a case study using rapid screening phytotest endpoint // J. Soil. Sediment. 2018. V. 18. № 3. С. 750–761.
 20. Юдина Н.В., Савельева А.В., Линкевич Е.В. Изменение состава гуминовых кислот при механохимическом воздействии на торф и уголь // Химия тверд. топлива. 2019. № 1. С. 34–40.
 21. Сивакова Л.Г., Лесникова Н.П., Ким Н.М., Ротова Г.М. Физико-химические свойства гуминовых веществ торфа и бурого угля // Химия тверд. топлива. 2011. № 1. С. 3–8.
 22. Якименко О.С., Изосимов А.А. Сравнительная химическая характеристика гуминовых кислот из промышленных гуматов различного генезиса // Тр. V Всерос. конф. “Гуминовые вещества в биосфере”. 2010. С. 474–479.
 23. Yakimenko O., Khundzhua D., Izosimov A., Yuzhakov V., Patsaeva S. Source indicator of commercial humic products: UV-Vis and fluorescence proxies // J. Soil. Sediment. 2018. V. 18. № 4. С. 1279–1291.
 24. Yakimenko O., Izosimov A. Structure and properties of humates from coalified materials, peat and sapropel // Humic substances in ecosystems: Abstracts of the international conference. Slovakia, Soporna, 2009. P. 43–45.
 25. Francioso O., Ciavatta C., Montecchio D., Tugnoli V., Sanchez-Cortes S., Gessa C. Quantitative estimation of peat, brown coal and lignite humic acids using chemical parameters, ¹H-NMR and DTA analyses // Biore-source Technol. 2003. V. 88. № 3. С. 189–195.
 26. Francioso O., Montecchio D., Gioacchini P., Ciavatta C. Thermal analysis (TG–DTA) and isotopic characterization (¹³C–¹⁵N) of humic acids from different origins // Appl. Geochem. 2005. T. 20. № 3. С. 537–544.
 27. Якименко О.С., Терехова В.А., Пукальчик М.А., Горленко М.В., Попов А.И. Сравнение двух интегральных биотических индексов при оценке эффектов воздействия гуминовых препаратов в модельном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 7. С. 781–792.
 28. Якименко О.С., Степанов А.А., Терехова В.А., Попов А.И. Гуминовые продукты из различного органического сырья: состав, свойства и биологическая активность // Гуминовые вещества в биосфере. 2018. С. 137–138.
 29. Muscolo A.A., Sidari M., Cozzolino V., Nuzzo A., Nardi S., Piccolo A. Molecular characteristics of humic substances from different origins and their effects on growth and metabolism of *Pinus laricio* callus // Chem. Biol. Technol. Agricult. 2022. V. 9. № 1. С. 1–18.
 30. Звягинцев Д.Г. (ред.). Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
 31. Классификация и диагностика почв СССР. 1977. М.: Колос, 1977. 222 с.

Humic-Based Soil Modifiers from Peat and Coal: Effect on Chemical and Biological Properties of Model Soil Mixtures

A. A. Stepanov^a and O. S. Yakimenko^{a,#}

^a*M.V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory 1, bld. 12, Moscow 119992, Russia*

[#]*E-mail: iakim@soil.msu.ru*

The impact of humic-based soil modifiers (HSM) produced from peat and coal (“Torfogel” and “Uglegel” accordingly) on chemical properties, cellulolytic activity and productivity of model soil mixtures (artificial soils) was evaluated in a pot experiment. Soddy-podzolic cultivated soil of the Moscow region was used as a natural reference soil. It is shown that an increase in the proportion of both HSM from 3 to 15% in soil mixtures improved their main agrochemical indicators: content of NPK and humus reached high levels, comparable to and exceeding those for the reference soil. Significant differences occurred starting from 5% of “Uglegel” content in mixtures, and 7% of “Torfogel”. Soil treatment with HSM stimulated the biological activity of soil mixtures, as well as plant growth and development. All the above trends were much more pronounced when treated with “Uglegel” in comparison with “Torfogel”. This fact could be due to organic matter genesis of peat- and coal-originated HSM. The results of the work can be used to create stable and productive artificial soils.

Key words: humic fertilizers, artificial soils, soil chemical properties, humus, productivity, biological activity.

ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ПРИМЕНЕНИИ *Bacillus* sp. И БИОЧАРА ДЛЯ СТИМУЛЯЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЖНИВНЫХ ОСТАТКОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ (*Triticum aestivum* L.)¹

© 2023 г. Т. В. Минникова^{1,*}, Н. С. Минин¹, С. И. Колесников¹,
А. В. Горовцов¹, В. А. Чистяков¹

¹Южный федеральный университет
344006 Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, Россия

*E-mail: loko261008@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.12.2022 г.

После доработки 20.01.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Стабильное функционирование сельскохозяйственных земель невозможно без поддержания плодородия почвы. Однако на полях зачастую остается много пожнивных остатков, которые достаточно долго разлагаются и превращаются в доступную органику. Для повышения скорости разложения пожнивных остатков зерновых культур (пшеницы, ячменя и других) необходимо внесение препаратов-биостимуляторов. Биостимуляторы представляют собой разнообразные вещества, которые стимулируют разложение органических веществ и благоприятно воздействуют на почвенную микробиоту. В статье рассматривается влияние *Bacillus* sp. на процессы разложения пожнивных остатков пшеницы как самостоятельно, так и совместно с биочаром. Цель исследования – оценить фитотоксичность чернозема обыкновенного при разложении пожнивных остатков озимой пшеницы под влиянием *Bacillus* sp. и биочара. Для оценки экологического состояния почвы применяли следующие методы исследования: оценку скорости разложения целлюлозы (определение целлюлозолитической активности), оценку экологического состояния почвы (интенсивности эмиссии CO₂, изменения интенсивности начального роста и развития озимого ячменя (*Hordeum Vulgare* L.)). Внесение *Bacillus* sp. × 100 и совместное применение биочара и *Bacillus* sp. стимулировало разложение целлюлозы до 14–15% от фонового содержания. Инокуляция *Bacillus* sp. на биочаре была эффективна уже при рекомендуемой дозе как для разложения целлюлозного полотна, так и для восстановления экологического состояния почвы, демонстрируя синергетический эффект. Полученные результаты необходимо использовать при проведении мероприятий по повышению плодородия почв сельскохозяйственных угодий и экологическом мониторинге состояния почв.

Ключевые слова: почва, биостимуляция, дружность прорастания, энергия прорастания, скорость прорастания, всхожесть, длина корней и побегов, масса побегов и корней, модельный эксперимент, экологическое состояние.

DOI: 10.31857/S0002188123050058, EDN: URWPDQ

ВВЕДЕНИЕ

Черноземы – это самые плодородные почвы в мире [1]. В России черноземы занимают >50% от всей площади в мире [2]. Уровень плодородия черноземов в непосредственной степени влияет

на урожайность возделываемых культур. Потеря влаги и органического вещества, а также искусственная замена нативной растительности сельскохозяйственными культурами в условиях современного земледелия могут привести к усилению эродированности почв и значительному снижению их плодородия [3–9].

Пожнивные растительные остатки сельскохозяйственных культур подвержены биологическому разложению в почве в зависимости от содержания в почве микроорганизмов, температуры почвы и количества атмосферных осадков [10–12]. Полное разложение пожнивных раститель-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории “Агробиотехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции” в рамках программы развития межрегионального научно-образовательного центра Юга России (ЛабНОЦ-21-01АБ) и Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета (“Приоритет 2030”) (№ СП-12-22-10).

ных остатков сельскохозяйственных культур в почвах — это длительный процесс, охватывающий от нескольких лет до десятилетий [10].

Одной из основных составляющих эффективного ведения земледелия является создание бездефицитного баланса органического вещества в почве, который может быть обеспечен как внесением органических удобрений, так и за счет использования пожнивных растительных остатков сельскохозяйственных культур-предшественников [13–16]. Использование процесса разложения пожнивных растительных остатков сельскохозяйственных культур является наиболее доступным и экономически выгодным, поскольку позволяет с биомассой растений частично вернуть в почву вынесенные элементы минерального питания [17–19]. Пожнивные остатки сельскохозяйственных культур являются одним из источников почвенного углерода [15, 20]. В ряде исследований установлено, что повышение скорости разложения пожнивных остатков приводит к улучшению физических характеристик почвы, стимуляции активности ферментов и повышению урожайности сельскохозяйственных культур [21–24]. Пожнивные остатки сельскохозяйственных культур являются эффективными сорбентами и уменьшают вымывание пестицидов из почвы [25–29]. Однако накопление большого количества остатков соломы в почве может привести к ряду негативных последствий, связанных с непрерывным поступлением и медленным разложением соломы [30]. Биоактивные органические кислоты (как муравьиная и уксусная) образуются в почве при разложении соломы и подавляют рост корней и проростков сельскохозяйственных культур. Более того, исследования по выращиванию культур свидетельствуют о явлениях патогенности и тяжести болезней растений [23, 31, 32]. Для ускорения процесса разложения пожнивных остатков используют различные методы. К таким методам относят биостимуляцию с использованием бактерий-целлюлозолитиков или органических веществ-биостимуляторов. Стимуляция аборигенной микробиоты (биостимуляция) происходит при добавлении биологически активных веществ. Биостимуляторы не являются питательными веществами, а способствуют усвоению питательных веществ, благотворно влияют на рост сельскохозяйственных культур и их устойчивость к физической и химической нагрузке [33].

Биочар — это уголь, полученный в результате пиролиза различных материалов (растительности, костей животных и пр.) [34–36]. Биочар характеризуется высоким содержанием углерода, большая часть которого находится в виде ароматических структур.

Добавление биочара в почву положительно влияет на физико-химические свойства почвы, такие как pH, структурность, удержание питательных веществ, что приводит к изменению структуры микробного сообщества [37–39]. Кроме того, пористая структура биочара является хорошим убежищем для почвенных микроорганизмов [40]. С повышением температуры пиролиза ароматические кольца все чаще структурируются в графеновых листах вместо случайно упорядоченных аморфных ароматических структур [41–43], показывая меньшее количество включенного водорода и кислорода [44]. Ароматические молекулы очень стабильны и являются причиной того, что биочар не разлагается полностью в течение столетий или даже тысячелетий [45, 46]. Учитывая резкое сокращение запасов углерода в органическом веществе почвы из-за землепользования и изменения климата, устойчивость биочара делает его привлекательным с целью связывания углерода в качестве стратегии смягчения последствий изменения климата [47–51].

Доказан синергический эффект инокуляции арбускулярной микоризой в биочаре на состояние почвы и повышение продуктивности растений при загрязнении [22]. Инокуляция арбускулярной микоризой и внесение биочара улучшают рост растений, стимулируют активность почвенных микробов, снижая фитодоступность Cd [31]. Инокуляция фосфатсольюбилизирующих бактерий также является устойчивым подходом к увеличению доступного содержания фосфора в почвах для производства сельскохозяйственных культур [52]. Иммобилизация бактерий на биочаре — это перспективный метод повышения активности аборигенных организмов вместе с привнесенными штаммами, в частности, в отношении разложения пожнивных остатков сельскохозяйственных культур.

Цель работы — оценка экологического состояния чернозема обыкновенного под влиянием *Bacillus* sp. и биочара на разложение пожнивных остатков озимой пшеницы. Задачи исследования: 1 — оценка самостоятельного и совместного влияния *Bacillus* sp. и биочара на биологическую активность чернозема с пожнивными остатками озимой пшеницы; 2 — выявление наличия/отсутствия антагонистического либо синергического эффекта; 3 — определение вклада *Bacillus* sp. и биочара на изменение состояния биологических показателей почвы.

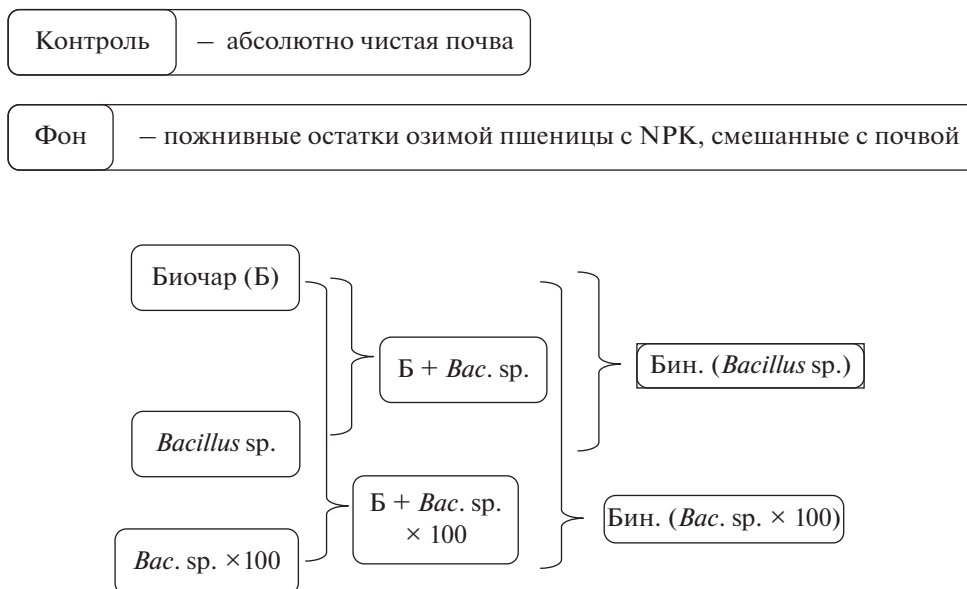


Рис. 1. Схема эксперимента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выбран чернозем обыкновенный карбонатный (Апах, слой 0–25 см). Место отбора — Ботанический сад Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону. Чернозем обыкновенный характеризовался содержанием органического углерода 4.5–6.5%, карбонатов — 0.3–0.5%, ЕКО — 40–45 мг-экв/100 г почвы [53].

Микробиологический препарат был создан на основе консорциума штаммов аэробных спорообразующих бактерий р. *Bacillus* sp. ВКПМ В-1895, проявляющих антагонистическую активность в отношении фитопатогенных грибов. Культурно-морфологические признаки штамма: колонии белого цвета размером 3–5 мм, с волнистым краем. Бактерии культивируются на МПА, при 370°C. Штамм *Bacillus subtilis* ВКПМ В-1895 не является генетически модифицированным штаммом и относится к непатогенным для человека микроорганизмам, согласно классификации микроорганизмов, приведенной в санитарных правилах СП 1.3.2322-09. Общая рекомендуемая доза препарата составляет 20 мл на 1 га почвы (2.5×10^{-6} мл/300 г почвы). Анализировали нормы применения: рекомендуемую *Bacillus* sp. и в 100 раз больше от рекомендуемой (*Bacillus* sp. × 100).

Биочар — это активированный уголь, который образуется в результате безкислородного пиролиза органических веществ (дерева, листьев, костей и других веществ) [54–57]. Использование биочара позволяет сорбировать тяжелые металлы (ТМ) и некоторые полициклические ароматические уг-

леводороды (ПАУ) как бензапирен [58, 59]. Добавление биочара в почву, загрязненную нефтью и нефтепродуктами, в том числе ПАУ, стимулирует аборигенную биоту [60]. Усиление активности биоты происходит за счет дополнительных источников азота, способных выравнять равновесие минеральных элементов в почве и оптимизировать деятельность микробиоты на разложение нефти до простых и нетоксичных для почвы продуктов. Исследовали концентрацию биочара — 1% от массы почвы.

Для оценки влияния *Bacillus* sp. и биочара на процесс стимуляции разложения пожнивных остатков озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в лабораторных условиях был проведен модельный эксперимент (рис. 1). Для этого пожнивные остатки озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) были собраны с поля озимой пшеницы после сбора урожая, тщательно просушены на воздухе, чтобы избежать порчи. Высушенную солому нарезали аккуратно ножницами до размера частиц 0.5–1.0 см.

В рамках эксперимента производили сравнение самостоятельного влияния *Bacillus* sp. и биочара на процессы разложения пожнивных остатков озимой пшеницы, а также совместного влияния *Bacillus* sp. с биочаром. Оценивали влияние биочара, инокулированного *Bacillus* sp., на биологические свойства чернозема обыкновенного. Предполагали, что при добавлении *Bacillus* sp. и биочара ожидается повышение скорости разложения пожнивных остатков соломы и стимуляция биологических показателей чернозема обыкновенного.

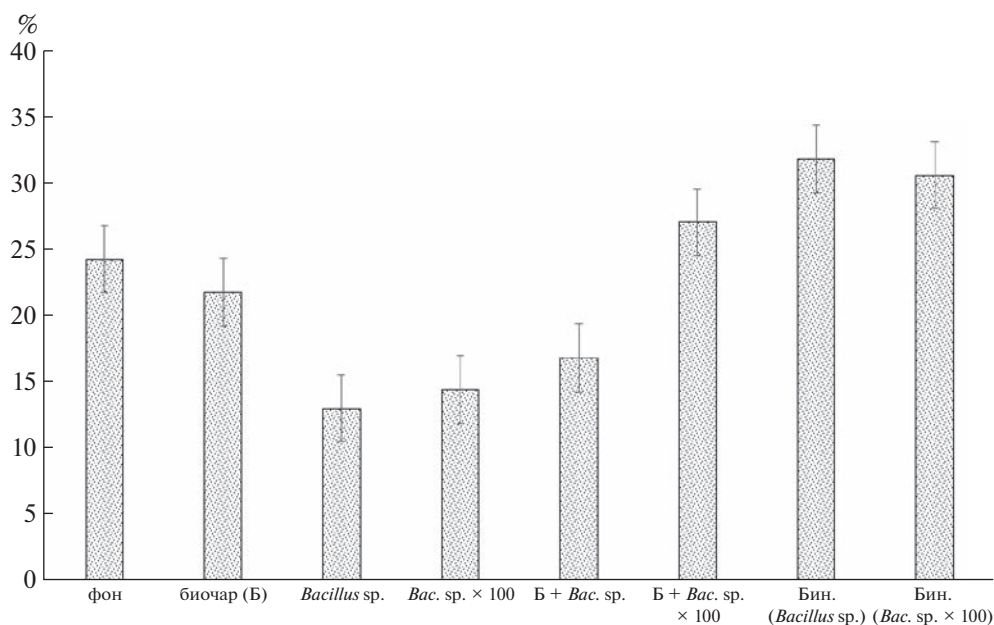


Рис. 2. Изменение эмиссии CO₂ чернозема обыкновенного при добавлении биочара и *Bacillus* sp.

Фоном в вариантах была почва с добавлением пожнивных остатков озимой пшеницы и комплексного азотно-фосфорно-калийного удобрения (НРК).

Для оценки биологической активности почвы определяли: целлюлозолитическую активность почвы по методу Мишустина—Вострова—Петровой (1993 г.). В каждый образец в предварительно изготовленный разрез в емкости с почвой помещали полотно ткани. По истечении периода экспонирования сохранившиеся остатки полотен аккуратно вынимали из разреза, просушивали, очищали от почвы и взвешивали.

Интенсивность эмиссии CO₂ оценивали с помощью газоанализатора “EGM PP Systems” путем измерения каждой емкости с образцом почвы. Оценка эмиссии CO₂ из почвы рассчитывали по приросту концентрации CO₂ в камере при равномерном ее увеличении.

Фитотоксичность измеряли по показателям прорастания семян ячменя (*Hordeum Vulgare* L.) сорта Леон (всхожесть, энергия, дружность, скорость прорастания) и показателям интенсивности начального роста семян (длина побегов и корней, фитомасса побегов и корней). Изменения данных характеристик фиксировали ежедневно в течение 7 сут после посева семян.

Для определения достоверности данных проводили их математическую обработку методами многофакторного и корреляционного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение эмиссии CO₂. Оценка эмиссии углекислого газа (CO₂) чернозема отражает побочные продукты разложения углеродсодержащих материалов, в том числе нефти и целлюлозы [61–65]. На рис. 2 показано, что биочар не оказывал влияние на эмиссию CO₂ по сравнению с фоном. При добавлении *Bacillus* sp. и *Bacillus* sp. × 100, биочар + *Bacillus* sp. ингибирование выделения CO₂ составило 11, 10 и 7% по сравнению с фоном.

При добавлении *Bacillus* sp. × 100 и биочара эмиссия CO₂ достоверно не отличалась от фона. При добавлении биочара, инокулированного *Bacillus* sp., и биочара, инокулированного *Bacillus* sp. × 100 эмиссия была повышена на 8 и 7% соответственно по сравнению с фоном.

Таким образом, установлено, что биочар, инокулированный *Bacillus* sp., являлся инициатором повышения концентрации CO₂ в почвенном воздухе и как следствие — разложения целлюлозного полотна с большей скоростью.

Изменение целлюлозолитической активности. Целлюлозолитическая активность почв отражает скорость разложения целлюлозного полотна в почве и активность почвенной биоты. Чем меньше масса полотна после инкубации, тем эффективнее деятельность целлюлозаразрушающих микроорганизмов. На рис. 3 представлена закономерность разложения полотна при добавлении биочара и *Bacillus* sp. В почве фона (пожнивные остатки озимой пшеницы с почвой) без добавле-

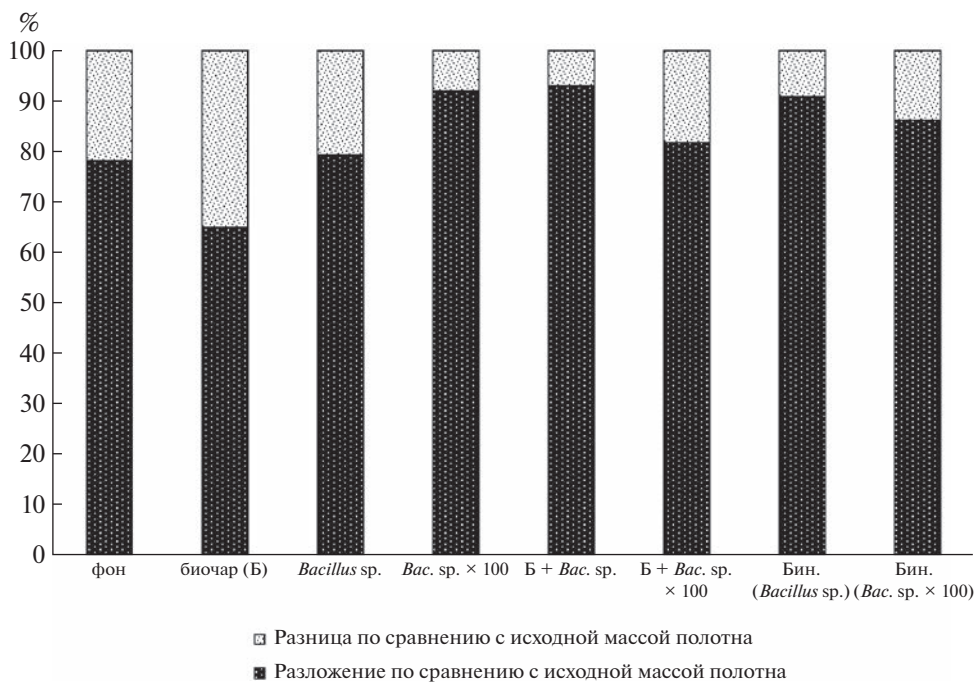


Рис. 3. Изменение целлюлолитической активности чернозема обыкновенного при добавлении биочара и *Bacillus* sp.

ния биочара и *Bacillus* sp. скорость разложения полотна была только на 22% меньше исходной массы полотна. Установлено, что по сравнению с фоновым содержанием, где при добавлении 1% биочара в почву фона наблюдали снижение целлюлолитической активности на 35% по сравнению с исходной массой полотна.

При добавлении *Bacillus* sp. и *Bacillus* sp. × 100 целлюлолитическая активность была снижена на 20 и 8% по сравнению с исходной массой полотна. При добавлении бактериального препарата *Bacillus* sp. вместе с биочаром и *Bacillus* sp. × 100 и биочара, целлюлолитическая активность была снижена на 7 и 18% по сравнению с исходной массой полотна. При добавлении биочара инокулированного *Bacillus* sp., и биочара инокулированного *Bacillus* sp. × 100 целлюлолитическая активность была снижена на 9 и 14% по сравнению с исходной массой полотна.

Исходя из полученных результатов очевидно, что применение *Bacillus* sp. × 100, *Bacillus* sp. с биочаром и биочара, инокулированного *Bacillus* sp. позволило стимулировать разложение полотна более чем на 90% по сравнению с исходной массой.

Изменение интенсивности начального роста и развития ячменя. Изменение интенсивности начального роста растений ячменя при добавлении биочара и *Bacillus* sp. представлено на рис. 4. Добавление биочара не оказывало достоверного воздействия на всхожесть, дружность, энергию и

скорость прорастания семян ячменя. Добавление *Bacillus* sp. привело к ингибированию всхожести, уменьшению дружности, энергии и скорости прорастания ячменя на 20–25% относительно фона. При повышении концентрации *Bacillus* sp. × 100 всхожесть и дружность прорастания были менее ингибированы – 16 и 15% соответственно, а энергия и скорость прорастания были на уровне рекомендованной методики применения *Bacillus* sp.: 21 и 25% относительно фона соответственно.

При добавлении биочара с *Bacillus* sp. установлено снижение показателей интенсивности начального роста на 19–25% относительно фона, при большей дозе *Bacillus* sp. × 100 всхожесть и дружность достигли уровня фона, а энергия и скорость прорастания были снижены на 14 и 16% относительно фона. При применении биочара, инокулированного *Bacillus* sp., наблюдали снижение всхожести, дружности, энергии прорастания ячменя на 16–19% относительно фона, а скорость прорастания была снижена на 24%. При добавлении биочара, инокулированного *Bacillus* sp. × 100, наблюдали стимуляцию всхожести и дружности на 20 и 21% по сравнению с фоном, а энергия и скорость прорастания снизились на 34 и 32% соответственно.

Показатели развития ячменя после всходов оценивали по изменению длины побегов и корней, а также массе сухих побегов и корней (рис. 5). Биочар не оказывал достоверного влияния на

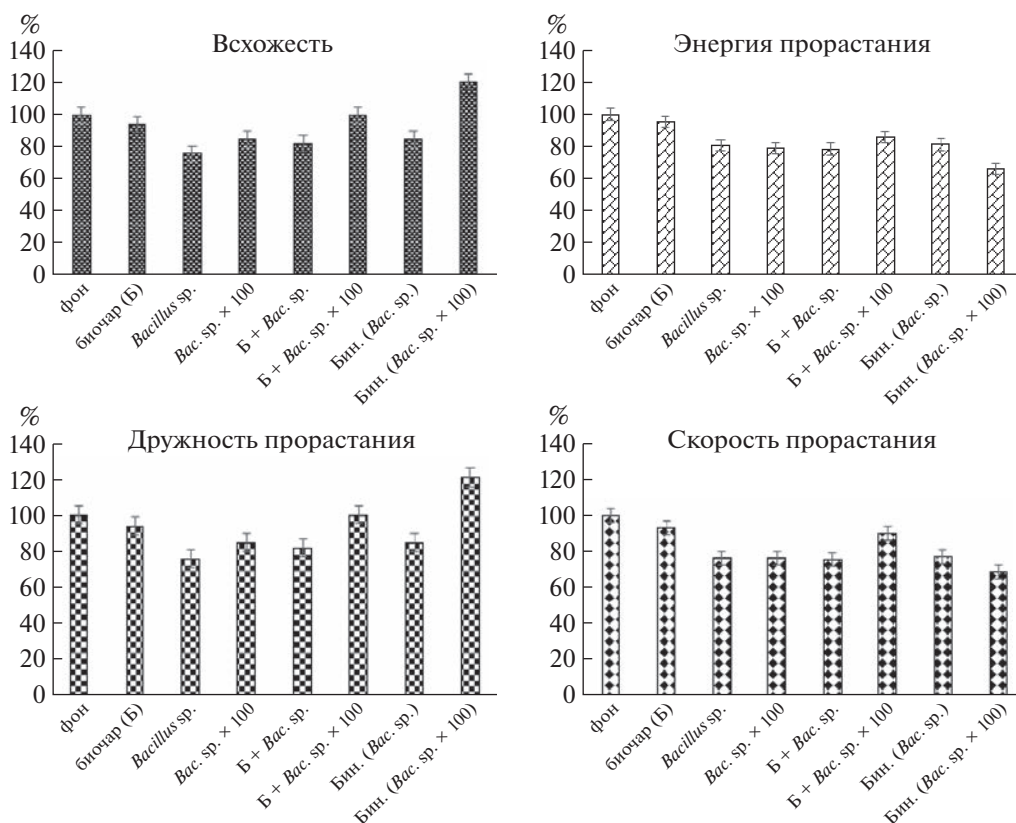


Рис. 4. Изменение интенсивности начального роста семян ячменя (*Hordeum Vulgare* L.) на черноземе обыкновенном при добавлении биочара и *Bacillus* sp.

массу побегов, ингибируя массу корней, длину побегов и корней на 11, 26 и 15% соответственно относительно фона.

При добавлении *Bacillus* sp. наблюдали снижение массы побегов и корней на 53 и 80% относительно фона соответственно. При этом длина побегов и корней после применения *Bacillus* sp. была ингибирована только лишь на 43 и 48% относительно фона. При повышении дозы *Bacillus* sp. × 100 масса корней и длина побегов не отличались от контроля, а масса побегов была простимулирована на 17% относительно фона. Длина побегов ячменя при добавлении *Bacillus* sp. × 100 была ингибирована на 22% относительно фона.

Биочар с *Bacillus* sp. ингибировал массу побегов и корней, длину побегов и корней на 49, 31, 30, 42% относительно фона соответственно. При повышении дозы биочара с *Bacillus* sp. × 100 длина побегов и корней не отличалась от контроля, масса побегов была простимулирована на 46%, а масса корней ингибирована на 32% относительно фона. Инокуляция *Bacillus* sp. на биочаре привела к ингибированию длины побегов и массы корней на 32 и 35% соответственно. При этом длина корней и масса побегов были ингибированы только на 8

и 11%. С повышением дозы биочара, инокулированного *Bacillus* sp. × 100, установлена стимуляция массы побегов на 32%, ингибирование длины и массы корней на 29 и 31% от фона соответственно.

Внесение биочара и *Bacillus* sp. во всех концентрациях способствовало стимуляции эмиссии CO₂ и разложению целлюлозного полотна. Наибольший вклад каждого вещества в процесс разложения полотна и восстановление экологического состояния почвы установлен после внесения *Bacillus* sp. × 100 и биочара + *Bacillus* sp. × 100. Применение биочара из пшеничной соломы (0.2% от массы почвы), инокулированного с *Bacillus* sp. ZM20 оказалось наиболее эффективной обработкой для улучшения биологических свойств почвы, роста растений, урожайности и качества урожая кукурузы по сравнению со всеми другими обработками [66]. При добавлении биочара, инокулированного *Bacillus* sp. × 100, наблюдали максимальную стимуляцию всхожести и дружности прорастания семян. Такие результаты частично подтверждали гипотезу о том, что внесение в почву биочара улучшает состояние изученных черноземов, что отмечено в других исследованиях [67].

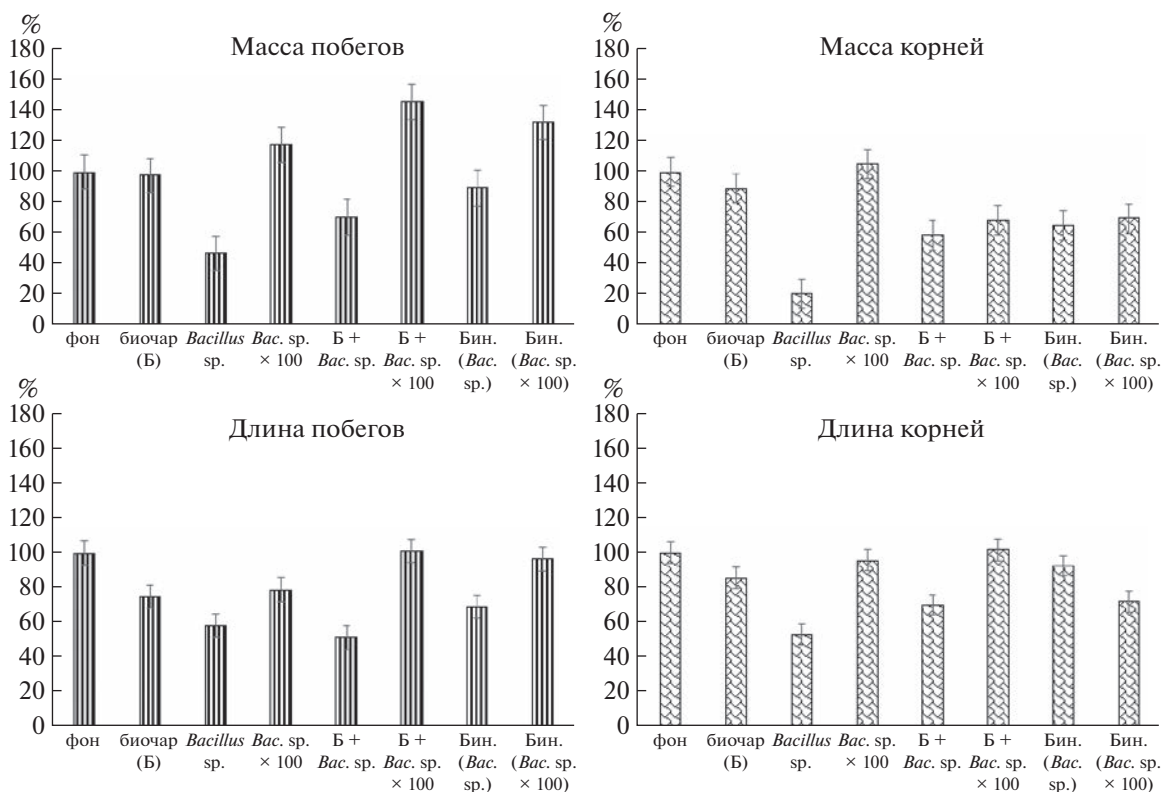


Рис. 5. Изменение показателей роста ячменя (*Hordeum vulgare* L.) на черноземе обыкновенном при добавлении биочара и *Bacillus* sp., % к контролю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования биочара и *Bacillus* sp. на процесс разложения целлюлозы в почве было установлено, что самостоятельное применение биочара и *Bacillus* sp. оказывало стимулирующее воздействие на большинство биологических показателей, но на скорость разложения целлюлозного полотна в почве не влияло. Внесение *Bacillus* sp. × 100 и совместное применение биочара и *Bacillus* sp. стимулировали разложение целлюлозы и улучшали показатели, характеризующие экологическое состояние почвы. Наибольший вклад каждого вещества в процесс разложения полотна и восстановление экологического состояния почвы установлен после внесения *Bacillus* sp. × 100 и биочар + *Bacillus* sp. × 100. Инокуляция *Bacillus* sp. на биочаре была эффективна уже при рекомендованной дозе *Bacillus* sp. как для разложения целлюлозного полотна, так и для восстановления экологического состояния почвы, демонстрируя синергетический эффект. Полученные результаты можно использовать при проведении мероприятий по повышению плодородия почв сельскохозяйственных угодий и экологическом мониторинге состояния почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Докучаев В.В. Русский чернозем: Отчет Вольному экономическому обществу. СПб., 1883. 376 с.
2. Kostić M.M., Rakić D.Z., Savin L.Đ., Dedović N.M., Simić M.Đ. Application of an original soil tillage resistance sensor in spatial prediction of selected soil properties // Comput. Electron. Agric. 2016. V. 127. P. 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.027>
3. Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3–12.
4. Минникова Т.В., Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Колесников С.И. Оценка зависимостей между гидротермическими показателями и ферментативной активностью черноземов Ростовской области при использовании различных агротехнологий // Агрофизика. 2018. № 1. С. 9–17. <https://doi.org/10.25695/AGRPN.2018.01.02>
5. Ахметзянов М.Р., Таланов И.П. Влияние приемов основной обработки почвы и растительной биомассы на продуктивность культур в звене севооборота // Плодородие. 2019. № 5 (110). С. 41–45. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.110.12>
6. Конищев А.А., Перфильев Н.В., Гарифуллин И.И. Исследование взаимосвязи “оптимальной плотности сложения” с влажностью почвы и урожайностью ячменя // Агрофизика. 2019. № 2. С. 25–31. <https://doi.org/10.25695/AGRPN.2019.02.04>

7. Сабитов М.М. Влияние многолетних трав на повышение плодородия почв и продуктивности зерновых культур // *Агрохим. вестн.* 2019. № 5. С. 50–54. <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10075>
8. Митрофанов Д.В. Влияние влажности, целлюлозо-литической активности почвы и макроэлементов питания на урожайность твердой пшеницы в степной зоне Оренбургской области // *Вестн. Воронеж. ГАУ.* 2022. Т. 15. № 1 (72). С. 90–100. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_90
9. Новиков А.А., Комарова О.П. Влияние состава культур севооборота на структурное состояние почвы // *Плодородие.* 2022. № 5 (128). С. 20–23. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.128.05>
10. Gregorich E.G., Janzen H., Ellert B.H., Helgason B.L., Qian B., Zebbarth B.J., Angers D.A., Beyaert R.P., Drury C.F., Duguid S.D., May W.E., McConkey B.G., Dyck M.F. Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon // *Glob. Change Biol.* 2017. V. 23. P. 1725–1734. <https://doi.org/10.1111/gcb.13502>
11. Муромцев Н.А., Семенов Н.А., Анисимов К.Б. Особенности влагопотребления и влагообеспеченности растений различных экологических групп // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева.* 2016. № 82. С. 71–87. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-82-71-87>
12. Несмеянова М.А., Дедов А.В. Приемы повышения плодородия почвы и их эффективность при возделывании подсолнечника // *Вестн. Курск. ГСХА.* 2022. № 4. С. 16–22.
13. Семькин В.А., Картамышев Н.И., Мальцев В.Ф., Дедов А.В. Биологизация земледелия в основных земледельческих регионах России / Под ред. Картамышева Н.И. М.: Колосс, 2012. 471 с.
14. Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // *Почвоведение.* 2019. № 10. С. 1172–1184. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113>
15. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б., Хромычкина Д.П., Ковалев И.В., Ковалева Н.О. Взаимосвязь размера агрегатов, содержания дисперсного органического вещества и разложения растительных остатков в почве // *Почвоведение.* 2020. № 4. С. 430–443. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20040139>
16. Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // *Агрохимия.* 2021. № 5. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
17. Кузнецова Т.В., Семенов А.В., Ходжаева А.К., Иванникова Л.А., Семенов В.М. Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разложении растительных остатков // *Агрохимия.* 2003. № 10. С. 3–11.
18. Дедов А.В., Несмеянова М.А., Хрюкин Н.Н. Приемы биологизации и воспроизводство плодородия черноземов // *Земледелие.* 2012. № 6. С. 4–6.
19. Мальцева А.Н., Золотарева Б.Н., Пинский Д.Л. Трансформация растительных остатков кукурузы в суглинистом и песчаном субстратах // *Почвоведение.* 2013. № 10. С. 1239.
20. Minnikova T., Mokrikov G., Kazeev K., Medvedeva A., Biryukova O., Keswani C., Minkina T., Sushkova S., Elgandy H., Kolesnikov S. Soil organic carbon dynamics in response to tillage practices in the steppe zone of Southern Russia // *Processes.* 2022. № 10. <https://doi.org/10.3390/pr10020244>
21. Пинский Д.Л., Мальцева А.Н., Золотарева Б.Н., Дмитриева Е.Д. Кинетика трансформации растительных остатков кукурузы и клевера в минеральных субстратах различного состава // *Почвоведение.* 2017. № 6. С. 690–697. <https://doi.org/10.7868/80032180X17060090>
22. Li H., Dai M., Dai S., Dong X. Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland – A review // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. V. 159. P. 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.014>
23. Yang H., Ma J., Rong Z., Zeng D., Wang Y., Hu S., Ye W., Zheng X. Wheat straw return influences nitrogen-cycling and pathogen associated soil microbiota in a wheat-soybean rotation system // *Front. Microbiol.* 2019. № 10. P. 1811. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01811>
24. Akhtar K., Wang W., Ren G., Khan A., Feng Y., Yang, Wang H. Integrated use of straw mulch with nitrogen fertilizer improves soil functionality and soybean production // *Environ. Int.* 2019. V. 132. Iss. 105092. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105092>
25. Marín-Benito J.M., Brown C.D., Herrero-Hernandez E., Arienzo M., Sánchez-Martín M.J., Rodríguez-Cruz M.S. Use of raw or incubated organic wastes as amendments in reducing pesticide leaching through soil columns // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 463–464. P. 589–599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.051>
26. Marín-Benito J.M., Sánchez-Martín M.J., Ordax J.M., Draoui K., Azejjel H., Rodríguez-Cruz M.S. Organic sorbents as barriers to decrease the mobility of herbicides in soils. Modelling of the leaching process // *Geoderma.* 2018. V. 313. P. 205–216. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2017.10.033>
27. Pérez-Lucas G., Aatik A.El., Vela N., Fenoll J., Navarro S. Exogenous organic matter as strategy to reduce pesticide leaching through the soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2020. V. 67. P. 934–945. <https://doi.org/10.1007/s002449900232>
28. Carpio M.J., Sánchez-Martín M.J., Rodríguez-Cruz M.S., Marín-Benito J.M. Effect of organic residues on pesticide behavior in soils: A review of laboratory research // *Environments.* 2021. V. 8. P. 28–32. <https://doi.org/10.3390/environments8040032>
29. Marín-Benito J.M., Herrero-Hernández E., Ordax J.M., Sánchez-Martín M.J., Rodríguez-Cruz M.S. The role of two organic amendments to modify the environmental fate of S-metolachlor in agricultural soils // *Environ. Res.* 2021. V. 195. Iss. 11087. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110871>
30. Wang L., Qin T., Liu T., Guo L., Li C., Zhai Z. Inclusion of microbial inoculants with straw mulch enhances grain yields from rice fields in central China // *Food*

- Energy Secur. 2020. V. 9. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1002/fes3.230>
31. Liu X., Tian F., Tian Y., Wu Y., Dong F., Xu J., Zheng Y. Isolation and identification of potential allelochemicals from aerial parts of *Avena fatua* L. and their allelopathic effect on wheat // J. Agric. Food Chem. 2016. V. 64. P. 3492–3500.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05498>
 32. Zhu H., Wang Z.X., Luo X.M., Song J.X., Huang B. Effects of straw incorporation on *Rhizoctonia solani* inoculum in paddy soil and rice sheath blight severity // J. Agric. Sci. 2014. V. 152. P. 741–748.
<https://doi.org/10.1017/S002185961300035X>
 33. Naeem K.N., Asghari M., Bano D., Babar A. Impacts of plant growth promoters and plant growth regulators on rain fed agriculture // PLoS ONE. 2020. V. 15 (4). P. 1–32.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231426>
 34. Lehmann J., Kleber M., Pan G., Bhupinder P.S., Sohi S.P., Zimmerman A.R. Persistence of biochar in soil // Biochar for environmental management: Science, technology, and Implementation. 2nd ed. Earthscan Rutledge, 2015. P. 235–282.
 35. Bashir S., Zhu J., Fu Q., Hu H. Cadmium mobility, uptake and anti-oxidative response of water spinach (*Ipomoea aquatica*) under rice straw biochar, zeolite and rock phosphate as amendments // Chemosphere. 2018. V. 194. P. 579–587.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.162>
 36. He M., Xiong X., Wang L., Hou D., Bolan N.S., Ok Y.S., Rinklebe J., Tsang D.C.W. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils // J. Hazard. Mater. 2021. V. 414. Iss. 125378.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>
 37. Shaaban M., Van Zwieten L., Bashir S., Younas A., Núñez-Delgado A., Chhajro M.A., Kubar K.A., Ali U., Rana M.S., Mehmood M.A., Hu R. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution // J. Environ. Manag. 2018. V. 228. P. 429–440.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.006>
 38. Cooper J., Greenberg I., Ludwig B., Hippich L., Fischer D., Glaser B., Kaiser M. Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions // Agric. Ecosyst. Environ. 2020. V. 295. Iss. 106882.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106882>
 39. Lee M.-H., Chang E.-H., Lee C.-H., Chen J.-Y., Jien S.-H. Effects of biochar on soil aggregation and distribution of organic carbon fractions in aggregates // Processes. 2021. V. 9 (8). P. 1431.
<https://doi.org/10.3390/pr9081431>
 40. Gul S., Whalen J.K., Thomas B.W., Sachdeva V., Deng H. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions // Agric. Ecosyst. Environ. 2015. V. 206. P. 46–59.
<https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2015.03.015>
 41. Paris O., Zollfrank C., Zickler G.A. Decomposition and carbonisation of wood biopolymers – a microstructural study of softwood pyrolysis // Carbon. 2005. V. 43 (1). P. 53–66.
 42. Keiluweit M., Nico P.S., Johnson M.G., Kleber M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) // Environ. Sci. Technol. 2010. V. 44 (4). P. 1247–1253.
 43. Verheijen F., Jeffery S., Bastos A.C. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions // Publ. Off. 2010. P. 149.
 44. Baldock J.A., Smernik R.J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (red pine) wood // Org. Geochem. 2002. V. 33 (9). P. 1093–1109.
 45. Lehmann J., Joseph S. Biochar for environmental management: an introduction // Biochar for environmental management: science, technology and implementation, Routledge, 2015. P. 1–13.
 46. Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics // Naturwissenschaften. 2000. V. 88. № 1. P. 37–41.
 47. Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis // Glob. Change Biol. 2002. V. 8 (4). P. 345–360.
 48. Lehmann J. Bio-energy in the black // Front. Ecol. Environ. 2007. V. 5 (7). P. 381–387.
 49. Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // Nature. 2011. V. 478 (7367). P. 49–56.
 50. Lehmann J., Rillig M.C., Thies J.E., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D.E. Biochar effects on soil biota – A review // Soil Biol. Biochem. 2011. V. 43. P. 1812–1836.
<https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2011.04.022>
 51. Bamdad H., Papari S., Lazarovits G., Berruti F. Soil amendments for sustainable agriculture: Microbial organic fertilizers // Soil Use Manag. 2021. V. 38. P. 120–194.
<https://doi.org/10.1111/sum.12762>
 52. Wang Z., Chen H., Zhu Z., Fang Xing S., Guang Wang S., Chen B. Low-temperature straw biochar: Sustainable approach for sustaining higher survival of *B. megaterium* and managing phosphorus deficiency in the soil // Sci. Total Environ. 2022. V. 830.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154790>
 53. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов-н/Д., 2008. 275 с.
 54. Ogbonnaya U., Semple K. Impact of biochar on organic contaminants in soil: a tool for mitigating risk? // Agronomy. 2013. V. 3 (2). P. 349–375.
<https://doi.org/10.3390/agronomy3020349>
 55. Šimanský V., Horák J., Igaz D., Balashov E., Jonczak J. Biochar and biochar with n fertilizer as a potential tool for improving soil sorption of nutrients // J. Soil. Sediment. 2018. V. 18. № 4. P. 1432–1440.
<https://doi.org/10.1007/s11368-017-1886-y>
 56. Chi N.T.L., Pugazhendhi A., Anto S., Mathimani T., Ahmed T.S., Kumar S.S., Shanmugam S., Samuel M.S., Brindhadevi K. A review on biochar production techniques and biochar based catalyst for biofuel produc-

- tion from algae // Fuel. 2021. V. 287. Iss. 119411. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119411>
57. Taraqqi-A-kamal A., Khan A., Zhang K., Sun P., Akther S., Atkinson C.J., Zhang Y. Biochar remediation of soil: linking biochar production with function in heavy metal contaminated soils // Plant Soil Environ. 2021. V. 67. № 4. P. 183–201. <https://doi.org/10.17221/544/2020-PSE>
 58. Сушкова С.Н., Яковлева Е.В., Минкина Т.М., Габов Д.Н., Антоненко Е.М., Дудникова Т.С., Барбашев А.И., Минникова Т.В., Колесников С.И., Раджпут В.Д. Накопление бенз(а)пирена в растениях разных видов и органогеомном горизонте почв степных фитоценозов при техногенном загрязнении // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 12. С. 200–214.
 59. Яковлева Е.В., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Габов Д.Н., Василевич М.И. Биоаккумуляция полициклических ароматических углеводородов в системе почва–растение // Агрохимия. 2008. № 9. С. 66–74.
 60. Яковлева Е.В., Хабибуллина Ф.М., Виноградова Ю.А., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Микробиологическая активность почв, загрязненных бенз(а)пиреном // Агрохимия. 2010. № 11. С. 63–69.
 61. Кудяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
 62. Петров А.М., Вершинин А.А., Акайкин Д.В., Юраниец-Лужаева Р.Ч. Изменение токсикологических свойств и респираторной активности дерново-подзолистых почв в условиях длительного нефтяного загрязнения // Экол. и пром-ть России. 2015. Т. 19. № 1. С. 50–53. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-1-50-53>
 63. Кудяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18060011>
 64. Кудяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15. <https://doi.org/10.1134/S000218811912007X>
 65. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудяров В.Н. Эмиссия CO₂, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19090090>
 66. Ahmad M., Wang X., Hilger T.H., Luqman M., Nazli F., Hussain A., Zahir Z.A., Latif M., Saeed Q., Malik H.A., Mustafa A. Evaluating biochar-microbe synergies for improved growth, yield of maize, and post-harvest soil characteristics in a semi-arid climate // Agronomy. 2020. № 10 (7). Iss. 1055. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071055>
 67. Romero C., Hao X., Li C., Owens J., Schwinghamer T., McAllister T. A., Okine E. Nutrient retention, availability and greenhouse gas emissions from biochar-fertilized chernozems // CATENA. 2021. V. 198. Iss. 105046. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105046>

Evaluation of Phytotoxicity of Common Chernozem in the Application of *Bacillus* sp. and Biochar for Stimulation of Decomposition of Winter Wheat Harvest Residues (*Triticum aestivum* L.)

T. V. Minnikova^{a,*}, N. S. Minin^a, S. I. Kolesnikov^a, A. V. Gorovtsov^a, and V. A. Chistyakov^a

^aSouthern Federal University
ul. B. Sadovaya 105/42, Rostov-on-Don 344006, Russia

*E-mail: loko261008@yandex.ru

Stable functioning of agricultural lands is impossible without maintaining soil fertility. However, there are often a lot of crop residues in the fields, which decompose for a long time and turn into available organic matter. To increase the rate of decomposition of crop residues of grain crops (wheat, barley and others), it is necessary to introduce biostimulants. Biostimulants are a variety of substances that stimulate the decomposition of organic substances and have a beneficial effect on the soil microbiota. The article examines the influence of *Bacillus* sp. on the processes of decomposition of crop residues of wheat both independently and together with biochar. The aim of the study was to evaluate the phytotoxicity of ordinary chernozem during the decomposition of crop residues of winter wheat under the influence of *Bacillus* sp. and biochar. To assess the ecological state of the soil, the following research methods were used: assessment of the rate of decomposition of cellulose (determination of cellulolytic activity), assessment of the ecological state of the soil (intensity of CO₂ emissions, changes in the intensity of initial growth and development of winter barley (*Hordeum vulgare* L.)). Introduction of *Bacillus* sp. × 100 and the joint use of biochar and *Bacillus* sp. it stimulated the decomposition of cellulose up to 14–15% of the background content. Inoculation of *Bacillus* sp. on the biochar, it was effective already at the recommended dose both for the decomposition of the cellulose web and for restoring the ecological state of the soil, demonstrating a synergistic effect. The results obtained should be used in carrying out measures to increase soil fertility of agricultural lands and environmental monitoring of soil conditions.

Key words: soil, biostimulation, germination friendliness, germination energy, germination rate, germination, length of roots and shoots, mass of shoots and roots, model experiment, ecological condition.

УДК: 581.1:633.16

ВЛИЯНИЕ ХЛОРИДНОГО ЗАСОЛЕНИЯ НА ПРОРОСТКИ ЯЧМЕНЯ¹© 2023 г. К. Б. Таскина^{1,*}, Н. М. Казнина¹, А. Ф. Титов¹¹Институт биологии Карельского научного центра РАН
185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия*E-mail: tasamayaksenia@gmail.com

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.

После доработки 15.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

В условиях контролируемой среды изучали влияние умеренного и сильного хлоридного засоления на проростки ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Нур. Воздействие на проростки умеренной (100 мМ) и высокой (200 мМ) концентраций NaCl в течение 7 сут приводило к замедлению роста их корней и побегов. В то же время в варианте с использованием NaCl в умеренной концентрации в листьях увеличивалось содержание пигментов (хлорофиллов и каротиноидов на 25 и 22% соответственно по отношению к контролю) при одновременном уменьшении скорости фотосинтеза (на 25%). В отличие от этого, под воздействием высокой концентрации NaCl содержание пигментов, а также устьичная проводимость заметно снижались, что сопровождалось почти двукратным замедлением скорости фотосинтеза. При этом тормозилась транспирация и уменьшалась оводненность тканей. Сделан вывод о том, что об устойчивости ячменя к NaCl можно судить уже на ранних фазах развития растений. Наиболее чувствительными к присутствию хлорида натрия в корнеобитаемой среде являются такие легко регистрируемые морфо-физиологические показатели, как линейный размер побега и его сырая биомасса.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., засоление, рост, водный обмен, фотосинтез, устьичная проводимость, транспирация.

DOI: 10.31857/S0002188123040129, **EDN:** DJLDRP

ВВЕДЕНИЕ

Засоление почв является одним из наиболее распространенных природных явлений, наблюдаемых во многих регионах нашей планеты. По имеющимся в литературе данным более 950 млн га почв в мире ($\approx 25\%$ поверхности суши) имеют повышенный уровень засоления ($>0.1\text{--}0.3\%$ легкорастворимых солей от общей сухой массы почвы), 6% из которых находится в России [1]. Причем площадь территорий, испытывающих засоление, постоянно увеличивается. Повышение концентрации солей в почве отрицательно сказывается на жизнедеятельности растений и приводит к значительным потерям урожая сельскохозяйственных культур. При этом наиболее сильное негативное воздействие на растения оказывает натрий-хлоридное засоление [2]. Показано, что увеличение концентрации ионов натрия и хлора в корнеобитаемой среде и в растениях приводит к повышению осмотического давления клеток, к

накоплению токсических ионов и, как следствие, нарушению водного баланса и минерального питания [3]. Также под влиянием NaCl тормозится скорость фотосинтеза и транспирации, замедляется рост и развитие растений, снижается их продуктивность [4–6].

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) является одной из наиболее важных злаковых культур в мире. Несмотря на то, что этот вид относится к гликофитам, он довольно устойчив к засолению [7, 8], что позволяет предполагать возможность его культивирования на слабо и умеренно засоленных почвах. Это находит подтверждение и в ряде работ, опубликованных ранее [9–11]. Однако следует отметить, что ответная реакция растений ячменя на засоление на уровне физиологических процессов, включая фотосинтез и фотосинтетический аппарат (ФСА), изучена лишь фрагментарно, хотя именно от активности ФСА в стрессовых условиях во многом зависит конечная продуктивность злаков. Добавим к этому, что в целом растения наиболее чувствительны к засолению именно на ранних фазах развития [12, 13], поэтому оценка их солеустойчивости, проведенная в фазе про-

¹ Финансовое обеспечение исследования осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (№ FMEN-2022-0004).

ростков, представляет наибольший интерес, в частности, в плане диагностики устойчивости к засолению разных видов (сортов, генотипов) и осуществляемой в селекционно-генетических исследованиях [14, 15].

Исходя из вышеизложенного, цель работы — изучение физиологических реакций проростков ячменя на умеренное и сильное хлоридное засоление.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служили проростки ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Нур. Семена предварительно замачивали в дистиллированной воде в чашках Петри. Проклюнувшиеся семена переносили в сосуды с питательным раствором Хогланда—Арнона (рН 6.2–6.4) объемом 1 л. В контрольном варианте питательный раствор был без хлорида натрия, в опытных вариантах в раствор добавляли соль NaCl (х.ч.) в концентрации 100 мМ (0.6%, 4.5 атм) или 200 мМ (1.2%, 9 атм). Эти концентрации (первая как умеренная, а вторая как высокая) были выбраны на основании предварительных опытов (в которых использовали концентрации NaCl от 20 до 200 мМ) и с учетом литературных данных. Растения выращивали в климатической камере при постоянных условиях: температуре воздуха 22–25°C, его относительной влажности 60–70%, ФАР 100 мкмоль/(м² с) и 14-часовом фотопериоде. Спустя 7 сут оценивали влияние хлоридного засоления на физиологические процессы и морфометрические показатели растений. О росте проростков судили по изменению (по отношению к контролю) длины наиболее развитого корня, высоты главного побега, сырой и сухой биомассы подземных и надземных органов. О состоянии ФСА судили по изменению (по отношению к контролю) площади листовой пластинки 1-го полностью закончившего рост листа, содержанию в нем хлорофиллов и каротиноидов, соотношению хлорофиллов (*a/b*) и их доли в светособирающих комплексах (ССК). Помимо этого, измеряли фотохимическую активность фотосистемы II (ФС II), устьичную проводимость и скорость фотосинтеза. О водном обмене растений судили по интенсивности транспирации и оводненности тканей корня и побега.

Площадь листовой пластинки рассчитывали по формуле $S = 2/3ld$, где *l* — длина, *d* — ширина листовой пластинки [16]. Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) определяли в 80%-ной ацетоновой вытяжке с помощью спектрофотометра (СФ-2000, Россия). Расчет доли хлорофиллов в ССК прово-

дили с учетом того, что весь хлорофилл *b* находится в ССК, а отношение хлорофиллов *a/b* в ССК равно 1.2 [17]. Максимальный квантовый выход фотохимической активности ФС II (F_v/F_m) измеряли с помощью флуориметра MINI-PAM (Walz, Германия) на адаптированных к темноте листьях. Интенсивность фотосинтеза и транспирации, а также устьичную проводимость измеряли с помощью установки для исследования CO₂-газообмена и водяных паров НСМ-1000 (Walz, Германия). Оводненность тканей (ОТ) рассчитывали по формуле: $ОТ = (сырая\ биомасса - сухая\ биомасса) / сырая\ биомасса \cdot 100\%$.

Биологическая повторность в пределах каждого варианта опыта составляла для разных показателей от 4-х до 12-ти растений, аналитическая повторность двух—пятикратная. Весь опыт повторяли дважды. Достоверность различий между контролем и опытом оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $P < 0.05$.

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали, что линейный рост корня и побега у 7-суточных проростков ячменя под влиянием засоления тормозился и тем сильнее, чем была больше концентрация соли в корнеобитаемой среде. При использовании NaCl в концентрации 100 мМ длина корня оказалась на 20% меньше, чем в контроле, высота побега — на 25%. При этом сырая и сухая биомасса подземных органов, а также сухая биомасса побега сохранялись на уровне контроля, тогда как сырая биомасса побега снижалась (на 30% по сравнению с контролем). Повышение концентрации соли до 200 мМ приводило к более значительному уменьшению длины корня и высоты побега (на 60% по отношению к контролю) и их сырой и сухой биомассы подземных (на 40 и 20% соответственно) и надземных (на 70 и 50% соответственно) органов (табл. 1). Важно отметить, что в условиях засоления у проростков увеличивалось (на 65 и 60% по сравнению с контролем) отношение сырой биомассы корня к сырой биомассе побега за счет более сильного ингибирования процесса накопления биомассы побега. Однако соотношение сухих биомасс оставалось при этом на уровне контроля.

Влияние засоления на ФСА растений также зависело от концентрации соли в корнеобитаемой среде. В частности, при использовании NaCl в концентрации 100 мМ листовая пластинка

Таблица 1. Влияние хлорида натрия на морфометрические показатели растений ячменя сорта Нур

Показатель	Варианты		
	контроль	100 мМ NaCl	200 мМ NaCl
Длина корня, см	12.4 ± 0.8	9.98 ± 0.52*	4.60 ± 0.08*
Высота побега, см	18.1 ± 0.6	13.9 ± 0.5*	6.96 ± 0.14*
Сырая биомасса корня, мг	89.4 ± 10.9	100 ± 6	56.4 ± 5.2*
Сухая биомасса корня, мг	9.40 ± 0.77	9.89 ± 0.48	7.41 ± 0.68*
Сырая биомасса побега, мг	279 ± 23	196 ± 8*	87.9 ± 4.3*
Сухая биомасса побега, мг	24.8 ± 2.2	20.2 ± 1.0	13.5 ± 0.7*
Отношение сырой биомассы корня и побега	0.311 ± 0.059	0.509 ± 0.057*	0.49 ± 0.22*
Отношение сухой биомассы корня и побега	0.421 ± 0.219	0.492 ± 0.039	0.54 ± 0.12

Примечание. Представлены средние величины и их ошибки.

*Отмечены отличия от контроля достоверные при $P < 0.05$. То же в табл. 2.

Таблица 2. Влияние хлорида натрия на состояние фотосинтетического аппарата растений ячменя сорта Нур

Показатель	Варианты		
	контроль	100 мМ NaCl	200 мМ NaCl
Площадь листа, см ²	8.64 ± 0.55	6.18 ± 0.27*	—
Содержание хлорофилла <i>a</i>	0.983 ± 0.009	1.236 ± 0.027*	0.862 ± 0.009*
Содержание хлорофилла <i>b</i>	0.415 ± 0.005	0.523 ± 0.015*	0.310 ± 0.006*
Содержание каротиноидов	0.237 ± 0.003	0.290 ± 0.001*	0.225 ± 0.002*
Отношение хлорофиллов <i>a/b</i>	2.369 ± 0.048	2.366 ± 0.021	2.783 ± 0.062*
Доля хлорофиллов в ССК, %	65.4	65.4	58.1*
<i>Fv/Fm</i>	0.792 ± 0.005	0.801 ± 0.002	0.783 ± 0.007

Примечание. Содержание хлорофиллов и каротиноидов дано в мг/г сырой массы, прочерк — лист полностью не развернулся.

1-го листа хотя и оказалась полностью развернутой, была заметно меньше (на 30%), чем в контроле (табл. 2). В варианте с концентрацией соли 200 мМ листовая пластинка не разворачивалась, свидетельствуя о явном отставании в развитии растений.

Известно, что в неблагоприятных условиях среды поддержание необходимого уровня фотосинтеза растений во многом зависит от содержания в листьях фотосинтетических пигментов. В наших опытах при воздействии хлорида натрия в концентрации 100 мМ содержание зеленых и желтых пигментов заметно повышалось (на 25 и 22% по сравнению с контролем соответственно). При этом отношение хлорофиллов, а также их содержание в ССК поддерживалось на уровне контроля. Увеличение концентрации NaCl в питательном растворе до 200 мМ приводило к снижению содержания в листьях хлорофиллов *a* и *b* (на 10 и 25% по сравнению с контролем соответственно), а также доли хлорофиллов в ССК (на 11%).

При этом соотношение хлорофиллов *a/b* увеличивалось (на 17% по отношению к контролю) за счет более сильного снижения содержания хлорофилла *b*. Содержание каротиноидов в листьях в этом варианте опыта незначительно, но достоверно также уменьшалось (на 5% по сравнению с контролем). Отрицательного влияния засоления на квантовую эффективность ФС II у ячменя обнаружено не было, величина показателя *Fv/Fm* у растений опытных вариантов даже при наибольшей концентрации NaCl практически не отличалась от контрольного варианта.

В ходе исследования было также установлено, что при обеих использованных в опытах концентрациях хлорида натрия значительно снижались устьичная проводимость (на 20 и 80% по сравнению с контролем соответственно) и скорость фотосинтеза (на 25 и 35% соответственно) (рис. 1).

Известно, что в условиях засоления необходимым условием успешного роста и развития растений является поддержание у них определенного

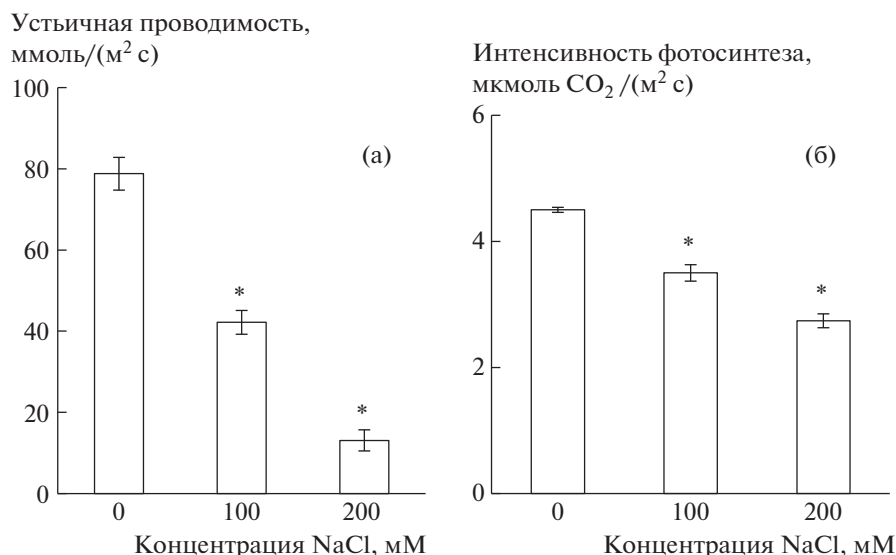


Рис. 1. Влияние хлорида натрия на устьичную проводимость (а) и скорость фотосинтеза (б) растений ячменя сорта Нур.

*Различия достоверны при $P < 0.05$. То же на рис. 2.

водного баланса [18]. В наших опытах при засолении у ячменя уменьшалась интенсивность транспирации. У опытных растений в присутствии NaCl в концентрации 100 mM она была почти в 2 раза меньше, чем у растений контрольного варианта (рис. 2). При этом оводненность тканей корня и побега в этих условиях сохранялась на уровне контроля (табл. 3). При использовании соли в концентрации 200 mM скорость транспирации снижалась еще сильнее (более, чем в 4 раза) (рис. 3).

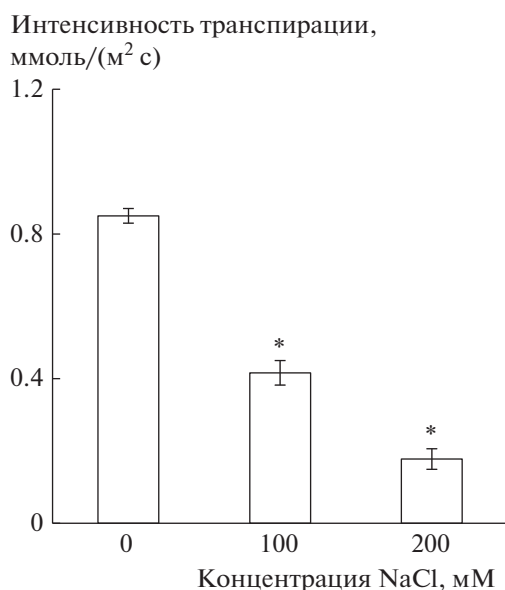


Рис. 2. Влияние хлорида натрия на интенсивность транспирации растений ячменя сорта Нур.

При этом значительно уменьшалась оводненность тканей корня и особенно побега.

Известно, что при высоком содержании солей в корнеобитаемой среде у растений тормозятся процессы роста и развития, замедляются фотосинтез и транспирация, снижается продуктивность, а в некоторых случаях даже может наступить гибель растений [19, 20]. Во многом это связано с нарушением водного баланса и ионного гомеостаза. В частности, обнаружено, что в присутствии ионов Na^+ и Cl^- в высоких концентрациях снижается водный потенциал почвенного раствора, вызывая дегидратацию клеток растений [3] и нарушение водного обмена [7, 21]. Помимо этого, чрезмерное засоление субстрата вызывает у растений различные токсические эффекты, связанные с повышением концентрации ионов Na^+ и Cl^- в клетках. Среди них отмечено подавление активности ферментов, возрастание количества активных форм кислорода и развитие окислительного стресса, изменение структуры органелл и дезинтеграция клеточных мембран [22, 23]. Имеются также данные о нарушении при повышенном уровне соли гормонального баланса растений, выражающееся в снижении уровня цитокининов [24] и увеличении содержания абсцизовой кислоты (АБК) [4], гибберелинов [25] и этилена [26, 27]. В условиях засоления изменяется и элементный состав растений. В частности, резко снижается содержание калия вследствие его утечки из-за деполяризации мембраны и нарушения пассивного транспорта ионов K^+ внутрь

клетки [28]. Наконец, высокие концентрации соли могут отрицательно влиять на деление, дифференцировку и растяжение клеток [29].

Указанные изменения физиологических процессов и показателей, вызванные хлоридом натрия, приводят к существенному торможению роста растений, что обнаружено у целого ряда видов, в том числе и у злаков. Например, NaCl в концентрации 50 мМ заметно тормозил рост риса (*Oryza sativa* L.) сорта Павловский [30], кукурузы гибрида Пионер [31], проса лозного (*Panicum virgatum* L.) [32]. При использовании высокой концентрации соли 200 мМ отмечено снижение более чем в 2 раза сухой биомассы побега сорго двукветного (*Sorghum bicolor* L.) [33] и райграса многолетнего (*Lolium perenne* L.) [34]. В наших опытах у 7-суточных проростков ячменя хлорид натрия в умеренной и высокой концентрациях (100 и 200 мМ соответственно) также тормозил рост корней и побегов и вызывал снижение сырой биомассы подземных и надземных органов. В то же время сухая биомасса корней и побегов значимо снижалась только при воздействии соли в концентрации 200 мМ, хотя их соотношение оставалось на уровне контрольных растений. Это важно, особенно в стрессовых условиях, поскольку нарушение соотношения подземной и надземной биомассы негативно отражается на минеральном питании и водном обмене растений и, как следствие, отрицательно сказывается на урожае зеленой массы и семян [35]. Способность ячменя накапливать сухую биомассу в условиях воздействия умеренной концентрации NaCl (100 мМ) на уровне контрольных растений, отмеченная в наших опытах, во многом объясняется поддержанием в данном случае относительно высокой скорости фотосинтеза. Это оказалось возможным благодаря увеличению содержания хлорофиллов и каротиноидов при уменьшении площади листа, а также сохранению на уровне контроля соотношения хлорофиллов (a/b) и их содержания в ССК, что обеспечивало необходимый уровень светопоглощения. Отсутствие изменений величины показателя F_v/F_m также свидетельствовало о поддержании эффективности работы ФС II в этих условиях. При использовании высокой концентрации соли 200 мМ сырая и сухая биомасса корней и побегов значительно снижались (по отношению к контролю). При этом уменьшалось содержание пигментов и количество хлорофиллов в ССК, что не могло не отразиться негативно на светопоглощении, в результате значительно тормозилась скорость фотосинтеза. Об ингибирующем действии высоких концентраций хлорида натрия на ФСА растений уже указывали ранее.

Таблица 3. Влияние хлорида натрия на оводненность тканей корня и побега растений ячменя сорта Нур

Показатель	Варианты		
	контроль	100 мМ NaCl	200 мМ NaCl
Оводненность тканей корня, %	88.8	90.0	86.8*
Оводненность тканей побега, %	90.6	89.7	84.5*

*Различия достоверны при $P < 0.05$.

Например, при концентрации соли 200 мМ уменьшалось содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях гибрида *Pennisetum* [36], в растениях мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) [37] и кукурузы (*Zea mays* L.) [38].

Помимо уменьшения содержания пигментов, замедление скорости фотосинтеза может являться следствием снижения доступности CO_2 в результате уменьшения устьичной проводимости, что ранее в условиях засоления отмечено, например, у некоторых генотипов кукурузы [38], ячменя [39], сортов пшеницы [40]. В нашем исследовании устьичная проводимость снижалась при обеих изученных концентрациях соли, однако если при применении концентрации 100 мМ это снижение составило 20% по отношению к контролю, то при использовании концентрации 200 мМ — 80%. Поскольку практически в равной степени у растений снижалась и интенсивность транспирации, можно предположить, что в этом варианте опыта происходило почти полное закрытие устьичной апертуры. Закрытие устьиц в условиях засоления является хорошо известным фактом. Причиной этого считается потеря воды замыкающими клетками устьиц, оттока из них ионов K^+ , а также повышение уровня АБК [21, 29, 41]. Вместе с тем частичное закрытие устьиц в условиях засоления может рассматриваться в качестве защитно-приспособительной реакции, направленной на сохранение оводненности тканей [6, 37], что, вероятно, и наблюдали в нашем опыте у ячменя в варианте с использованием концентрации соли 100 мМ. В отличие от этого в варианте с концентрацией 200 мМ оводненность тканей корня и побега значимо снижалась, что, очевидно, явилось одной из причин значительного уменьшения сырой биомассы корня и побега у проростков. Ранее снижение оводненности тканей под воздействием высоких концентраций соли в корнеобитаемой среде отмечали и другие авторы, проводившие исследования на растениях различных сортов ярового ячменя и пшеницы [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование показало, что на ранней фазе развития растения ячменя способны успешно адаптироваться к хлориду натрия в умеренной концентрации (100 мМ). Увеличение содержания хлорофиллов и каротиноидов при некотором снижении устьичной проводимости позволили поддерживать скорость фотосинтеза на уровне 75% от оптимальных условий. Уменьшение интенсивности транспирации позволило сохранить необходимый уровень оводненности тканей и обеспечили в этом случае растениям возможность накопления биомассы корней и побегов на уровне контроля. В отличие от этого высокая концентрация соли (200 мМ) приводила к уменьшению содержания пигментов, почти полному закрытию устьиц и резкому снижению устьичной проводимости, что сопровождалось явно выраженным замедлением скорости фотосинтеза. При этом нарушался водный обмен растений и уменьшалась оводненность тканей корня и побега.

В целом полученные результаты свидетельствовали о том, что об устойчивости ячменя к разному уровню засоления можно судить уже на ранних фазах развития растений. При этом наиболее чувствительными к повышению концентрации хлорида натрия в корнеобитаемой среде оказались морфометрические показатели, в частности, линейный размер побега и его сырая биомасса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников А.С., Пронько Н.А., Фалькович А.С., Бородычев В.В. Причины вторичного засоления орошаемых почв Нижнего Поволжья и его прогнозирование на основе математического моделирования влагопереноса // Изв. НВ АУК. 2018. № 2 (50). С. 9–17.
2. FAO (Food and Agriculture organization of the United Nations). Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils. 2008. Web site <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>
3. Балнокин Ю.В. Ионный гомеостаз и солеустойчивость растений. М.: Наука, 2012. 99 с.
4. Таланова В.В., Таланов А.В., Титов А.Ф. Динамика фотосинтеза и транспирации проростков огурца в начальный период хлоридного засоления и при действии фитогормонов // Докл. РАСХН. 2006. № 2. С. 10–13.
5. Munns R., James R.A., Lauchli A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals // J. Exp. Bot. 2006. V. 57. P. 1025–1043.
6. Веселов Д.С., Шарипова Г.В., Кудоярова Г.Р. Влияние NaCl засоления на реакции сортов ячменя, различающихся по засухоустойчивости // Агрохимия. 2008. № 10. С. 18–26.
7. Шарипова Г.В. Особенности роста и водного обмена растений пшеницы и ячменя с различной солеустойчивостью при натрий-хлоридном засолении: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2007. 22 с.
8. Зайцева Р.И., Желнакова Л.И., Никитина Н.С. Характеристика солеустойчивости кормовых культур в начальной фазе вегетации при засолении чернозема хлоридом натрия // Бюл. Почв. ин-та. 2009. № 63. С. 25–40.
9. Веселов Д.С., Шарипова Г.В., Кудоярова Г.Р. Сравнительное изучение реакции растений ячменя (*Hordeum vulgare*) и пшеницы (*Triticum durum*) на кратковременное и длительное действие натрий-хлоридного засоления // Агрохимия. 2007. № 7. С. 41–48.
10. Kanbar A., Drussi I. Effect of salinity stress on germination and seedling growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties // Adv. Environ. Biol. 2014. V. 8. P. 244–247.
11. Лубянова А.Р., Безрукова М.В., Шакирова Ф.М. Влияние засоления на рост и гормональный статус корней проростков ячменя и риса // Агрохимия. 2019. № 8. С. 52–59.
12. Sabah N. The effect of salinity on germination, growth characters, and emergence of barley *Hordeum vulgare* L. in different soil textures // J. Thi-Qar Univer. 2008. V. 4. № 1. P. 17–26.
13. Шарипова Г.В., Веселов Д.С. Ростовая реакция на засоление растений разных сортов ячменя и ее связь с водным обменом // Физиол. и биохим. культ. раст. 2011. Т. 43. № 2. С. 129–135.
14. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: Метод. рук-во / Под ред. Удовенко Г.В. Л.: ВИР, 1988. 226 с.
15. Niknam V., Bagherzadeh M., Ebrahimzadeh H., Sokhansanj A. Effect of NaCl on biomass and contents of sugars, proline and proteins in seedlings and leaf explants of *Nicotiana tabacum* grown in vitro // Biol. Plantarum. 2004. V. 48. P. 613–615.
16. Аникиев В.В., Кутузов Ф.Ф. Новый способ определения площади листовой поверхности у злаков // Физиология растений. 1961. Т. 8. № 3. С. 375–377.
17. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids pigments of photosynthetic biomembranes // Method. Enzymol. 1987. V. 148. P. 350–382.
18. Jones H.G. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops // Hort Sci. 1990. V. 25. P. 19–26.
19. Nawaz K., Hussain K., Majeed A., Khan F., Afghan S., Ali K. Fatality of salt stress to plants: morphological, physiological and biochemical aspects // Afric. J. Biotechnol. 2010. V. 9. № 34. P. 5475–5480.
20. Torabi M., Halim R.A., Mokhtarzadeh A., Miri Y. Physiological and biochemical responses of plants in saline environment // Crop biology and agriculture in harsh environments / Ed. Roychowdhury R. Lap Lambert Academic Publishing, 2013. № 9. P. 47–81.
21. Rajendran K., Tester M., Roy S.J. Quantifying the three main components of salinity tolerance in cereals // Plant Cell Environ. 2009. V. 32. № 3. P. 237–249.
22. Roychowdhury A., Paul S., Basu S. Cross-talk between abscisic acid-dependent and abscisic acid-independent pathways during abiotic stress // Plant Cell Rep. 2013. V. 32. № 7. P. 985–1006.

23. Semida W.M., Rady M.M. Pre-soaking in 24-epibrassinolide or salicylic acid improves seed germination, seedling growth, and anti-oxidant capacity in *Phaseolus vulgaris* L. grown under NaCl stress // J. Hortic. Sci. Biotechnol. 2014. V. 89. № 3. P. 338–344.
24. Веселов Д.С., Кудоярова Г.Р., Кудрякова Н.В., Кузнецов В.В. Роль цитокининов в стресс-устойчивости растений // Физиология растений. 2017. Т. 64. № 1. С. 19–32.
25. Битюцкий Н.П. Минеральное питание растений: учебник. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2020. 548 с.
26. Munns R. Plant adaptations to salt and water stress differences and commonalities // Adv. Botanic. Res. 2011. V. 57. P. 1–32.
27. Parihar P., Singh S., Singh R., Singh V., Prasad S.M. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review // Environ. Sci. Pollut. Res. 2025. V. 22. № 6. P. 4056–4075.
28. Zhu J.K. Genetic analysis of plant salt tolerance using *Arabidopsis* // Plant Physiol. V. 124. № 3. 2000. P. 941–948.
29. Алехина Н.Д., Балнокин Ю.В., Гавриленко В.Ф. Физиология растений / Под ред. И.П. Ермакова. М.: Изд. центр “Академия”, 2005. 640 с.
30. Гишова Н.Г. Солеустойчивость сортов риса: Дис. ... канд. биол. наук. Краснодар, 1999. 130 с.
31. Будаговская Н.В. Функциональные и морфологические изменения у растений в условиях засоления и блокирования кальциевых каналов // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды (Иркутск, 10–15 июля 2018 г.). Иркутск, 2018. С. 154–158.
32. Carson M.A., Morris A.N. Germination of *Panicum virgatum* cultivars in a NaCl gradient // BIOS. 2012. V. 83. № 3. P. 90–96.
33. Bavi V., Shiran B., Arzani A. Evaluation of salinity tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using ion accumulation, proline and peroxidase criteria // Plant Growth Regul. 2011. V. 64. P. 275–285.
34. Friell J., Watkins E. Review of cool-season turfgrasses for salt-affected roadsides in cold climates // Crop Sci. 2021. V. 61. P. 2893–2915.
35. Кудоярова Г.Р., Дедов А.В., Фархутдинов Р.Г., Веселова С.В. Передача сигналов и быстрая стрессовая реакция растений // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. Сер. Биол. Мат-лы выездной сессии ОФР РАН по проблемам биоэлектротрогенеза и адаптации у растений, 11–12 окт. 2000 г. С. 83–85.
36. Li P., Zhu Y., Song X., Song F. Negative effects of long-term moderate salinity and short-term drought stress on the photosynthetic performance of Hybrid *Pennisetum* // Plant Physiol. Biochem. 2020. V. 155. P. 93–104.
37. Белова Т.А., Кравченко А.С. Физиологические основы адаптации растений к воздействию солевого стресса // Auditorium. 2018. № 1 (17). С. 42–48.
38. Noreen Z., Zulfiqar Ali R., Saqib M. Effect of salinity stress on various growth and physiological attributes of two contrasting *Maize* genotypes // Brazil. Arch. Biol. Technol. [online]. 2020. V. 63.
39. Liu X., Fan Y., Mak M., Babla M., Holford P., Wang F., Chen G., Grace S., Gang W., Shabala S., Zhou M., Chen Z. QTLs for stomatal and photosynthetic traits related to salinity tolerance in barley // BMC Genomics. 2017. V. 18. P. 9.
40. Hassan I. Interactive effects of salinity and ozone pollution on photosynthesis, stomatal conductance, growth, and assimilate partitioning of wheat (*Triticum aestivum* L.) // Photosynthetica. 2004. V. 42. P. 111–116.
41. Таланова В.В., Минаева С.В., Солдатов С.Е., Титов А.Ф. Раздельное и комбинированное действие засоления и закалывающих температур на растения // Физиология растений. 1993. Т. 40. № 4. С. 584–588.

Effect of Chloride Salinization on Barley Seedlings

K. B. Taskina^{a, #}, N. M. Kaznina^a, and A. F. Titov^a

^aInstitute of Biology of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
Pushkinskaya ul. 11, Petrozavodsk 185910, Russia

[#]E-mail: tasamayaksenia@gmail.com

The influence of moderate and strong chloride salinity on seedlings of barley (*Hordeum vulgare* L.) Nur variety was studied under controlled environment conditions. Exposure of seedlings to both moderate (100 mM) and high concentrations (200 mM) of NaCl for 7 days led to a slowdown in the growth of their roots and shoots. At the same time, in the variant using NaCl in moderate concentration, an increase in the content of pigments was noted in the leaves of seedlings (chlorophylls and carotenoids by 25 and 22%, respectively). Also the photosynthesis rate decreased by 25% (relative to the control). In contrast, under the influence of a high concentration of NaCl, the content of pigments, as well as stomatal conductance, decreased markedly, which was accompanied by an almost twofold slowdown in the rate of photosynthesis. At the same time, transpiration was inhibited and tissue hydration decreased. It was concluded that the resistance of barley to NaCl can be judged already in the early phases of plant development. It is also noted that the most sensitive to the presence of NaCl in the root environment are easily recorded morpho-physiological indicators – the linear size of the shoot and its raw biomass.

Key words: barley (*Hordeum vulgare* L.), salinity, growth, water exchange, photosynthesis, stomatal conductivity, transpiration.

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА “ХИТОЗАН–ДИОКСИД ТИТАН” СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ¹

© 2023 г. А. С. Баикин^{1,*}, А. А. Мельникова¹, А. В. Михайлова^{1,2}, М. А. Каплан¹,
Е. О. Насакина¹, К. В. Сергиенко¹, С. В. Конушкин¹, Е. П. Севостьянова², Е. В. Степанова²,
С. В. Железова², А. П. Глинушкин², М. А. Севостьянов^{1,2}

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

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

*E-mail: imet@imet.ac.ru

Поступила в редакцию 09.12.2022 г.

После доработки 09.01.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Биопротекторные материалы для сельского хозяйства являются важной частью современного мира. Для их разработки используют широкий спектр различных соединений. Например, диоксид титана помимо защитных свойств положительно влияет на усваиваемость питательных веществ, улучшает эффективность удобрений и, соответственно, позволяет снизить их потребление, что особенно важно в современном мире. Однако прямое введение диоксида титана является малоэффективным из-за процессов его потери. Наилучшим вариантом является пролонгированное выделение, обеспечивающее требуемую для растения концентрацию диоксида титана в почве. Введение в полимерную матрицу диоксида титана может решить эту задачу за счет постепенного высвобождения. В свою очередь к такой полимерной матрице предъявляется целый ряд требований их свойств. Возможным решением может быть хитозан — нетоксичный, неиммуногенный, антимикробный, биологически безопасный и биodeградируемый материал. В работе рассмотрено получение композиционного материала “хитозан–диоксид титана” в гранулярной форме. Исследована эффективность материала с массовыми соотношениями хитозана к диоксиду титана 1 : 1, 2 : 1 и 3 : 1, а также хитозана без диоксида титана. Исследована структура и механические свойства полученных композиционных материалов.

Ключевые слова: хитозан, диоксид титана, композиционный материал, сельское хозяйство, биопротектор, механические свойства, структура.

DOI: 10.31857/S0002188123050034, **EDN:** URMUFA

ВВЕДЕНИЕ

Удобрения являются основным методом повышения плодородия почв. Из-за высокой растворимости, низкой термической стабильности и небольшого молекулярного веса обычных удобрений большая часть питательных веществ теряется в окружающей среде из-за поверхностного стока, денитрификации, выщелачивания и улетучивания, что приводит к низкой эффективности удобрений [1]. Кроме того, использование обычных удобрений является дорогостоящим из-за

низкой эффективности использования питательных веществ [2]. Таким образом, поиск новых видов/поколений/вариантов модификации удобрений является актуальной темой в последние десятилетия. Широкий круг исследований приходится на разработку инкапсулированных удобрений, обладающих возможностью длительного высвобождения активных агентов и обеспечивающих повышение эффективности удобрений за счет снижения растворимости питательных веществ, в то же время сохраняя требуемое питание для роста растений [3]. Достаточно подробный обзор таких материалов произведен в работе [4]. Однако эти исследования направлены исключительно на

¹ Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 22-23-00968, <https://rscf.ru/project/22-23-00968/>.

введение этих материалов в состав удобрения, и на данный момент существует очень широкий круг удобрений пролонгированного действия, основанных на различных принципах.

Большой областью исследований стало внедрение нанотехнологий в разработку и использование инновационных удобрений. Благодаря уникальным свойствам наноматериалов, это направление обладает большим потенциалом. Текущее состояние развития наноудобрений хорошо обобщено и обсуждено в нескольких недавних обзорных статьях [6–8].

Относительно новым направлением является изучение влияния непосредственно различного вида наночастиц на рост растений, качество плодов, эффективность удобрений в целом. Многочисленные исследования показали перспективность использования биопротекторных веществ (например TiO_2 , Ag, SiO_2 , ZrO_2 , CeO_2 и др.), позволяющих в перспективе сократить применение удобрений [9–13]. Данные вещества способны помимо биопротекторных свойств влиять на усвояемость и эффективность удобрений, позволяя в том числе сократить их требуемое количество. Ключевым звеном для создания препаратов такого типа является наличие адекватного материала, обладающего специальными свойствами, среди которых обязательными являются экологическая совместимость с окружающей средой и глобальными биосферными круговоротными циклами, т.е. разрушаемость, безопасность для живой и неживой природы; длительная (недели и месяцы) сохраняемость в природной среде и контролируемая деструкция с образованием нетоксичных продуктов; химическая совместимость с пестицидами и удобрениями; возможность переработки доступными способами, совместимыми с технологиями изготовления ядохимикатов. Среди материалов, которые могут оказаться пригодными для этих целей, – разрушаемые полимеры различного происхождения [14]. Анализ литературы свидетельствует об активном развитии работ, направленных на синтез и изучение полимеров на основе производных карбоновых кислот. Наряду с полилактидами и полигликолидами из полиэфиров, способных к биоразложению, особое место занимает хитозан [15]. Он известен своей нетоксичностью, неиммуногенностью, способностью к заживлению ран и антимикробными свойствами, что делает его подходящим кандидатом для реализации цели проекта. В структуре хитозана присутствуют активные amino- и гидроксильные функциональные группы. На них можно закреплять предлагаемые

препараты, что обеспечивает их выход по мере биodeградации полимера.

В данной работе был выбран диоксид титана TiO_2 . Исследования показали, что в требуемых дозах TiO_2 способен положительно влиять на рост растений, особенно на усваиваемость растениями фосфора [16, 17]. TiO_2 активируют также биодоступность питательных микроэлементов (Zn, Cu и Fe) и Al [18]. Эти результаты свидетельствуют о том, что TiO_2 имеет некоторое сродство с фосфатными соединениями и ионами металлов в почве, чтобы переводить их в растворимую форму, что увеличивает их биодоступность.

Равномерная иммобилизация диоксида титана в матрицу хитозана ведет к его минимальным потерям, повышению стабильности, предотвращению агрегации. Поэтому предполагали наибольшую эффективность диоксида титана в композиционном материале “хитозан– TiO_2 ”. Цель работы – разработать способ получения и исследовать структуру и механические свойства композиционного материала “хитозан–диоксид титан” для сельскохозяйственного назначения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения композиционного материала “хитозан–диоксид титана” вначале готовили раствор, состоящий из 0.9 мл ортофосфорной кислоты (Компонент-реактив, Россия, 87 мас. %) и 18 мл дистиллированной воды. Далее, при комнатной температуре в нем растворяли навеску высокомолекулярного хитозана (Sigma-Aldrich, США) массой 0.375 г при постоянном помешивании до гомогенного состояния (среднее время растворения составляло 1 ч). В полученный раствор добавляли порошок диоксида титана массой 0.25, 0.5 или 0.75 г (с массовыми соотношениями хитозана к диоксиду титана 1 : 1, 2 : 1 и 3 : 1) и перемешивали для равномерного распределения в объеме. Так же готовили раствор хитозана без добавления диоксида титана для сравнения. Гранулы композиционного материала “хитозан–диоксид титана” получали капельным методом. Для этого приготовленный раствор капали в избыток аммиака водного (Компонент-реактив, Россия, 87 мас. %) и оставляли минимум на 6 ч. После чего гранулы промывали дистиллированной водой. Для высушивания полученных гранул композиционного материала их сначала замораживали в течение 5 ч при температуре -19°C , далее помещали в лиофильную сушку.

Анализ структуры композиционного материала выполнили на оптическом микроскопе “Альтами



Рис. 1. Гранула композиционного материала “хитозан–диоксид титана”.

МЕТ”, оснащенного специализированной цифровой видеокамерой “Альтами U3CMOS14000KA” высокого разрешения. Для анализа изображений и изучения структуры полученного композиционного материала была использована лицензионная программа Altami Studio 4.0 Pro, с фильтром “Мультифокус”, позволявшим собрать из изображений с разным фокусным расстоянием одну картинку таким образом, чтобы все ее элементы были в фокусе.

Электронно-микроскопические исследования образцов проводили при помощи сканирующего электронного микроскопа “Hitachi TM4000”. Для исследования в растровом режиме морфологии частиц образцы наклеивали на медную подложку при помощи проводящего углеродного клея.

Механические свойства изученных образцов определяли в условиях статического сжатия на

универсальной испытательной машине “Instron 3382” со скоростью нагружения 0.5 мм/мин. На одну экспериментальную точку испытывали по 3–5 образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлен общий вид полученных гранул композиционного материала “хитозан–диоксид титана”. Гранулы имели сферическую форму, диаметр составлял ≈ 5 мм. На рис. 2, 3 показана структура полученных образцов композиционных материалов “хитозан–диоксид титана” с различным соотношением компонентов композиции.

Анализируя полученные изображения, можно отметить относительно равномерное распределение частиц диоксида титана. Они располагаются как на поверхности хитозана, так и внутри полученной матрицы. Их размер варьируется от 10 до 100 мкм. Частицы имеют сферическую форму. Можно отметить, что сферические частицы диоксида титана в некоторых местах имеют разломы. По данным разломам видно, что сферические частицы диоксида титана образованы вытянутыми стержнями. Такая структура скорее всего объясняется процессом сшивки хитозана в аммиаке и последующей сушкой. Композиционный материал вне зависимости от концентрации диоксида титана обладает пористой структурой, что достигается выбранным способом лиофильной сушки.

На рис. 4 представлена зависимость напряжения при сжатии от деформации. Напряжение при сжатии рассчитывали по формуле: $\sigma = F/d_{\text{гр}}$, где σ – напряжение при сжатии, МПа, F – сила, приложенная к образцу, при сжатии, $d_{\text{гр}}$ – диаметр гранулы, м². Исходя из структурного исследова-

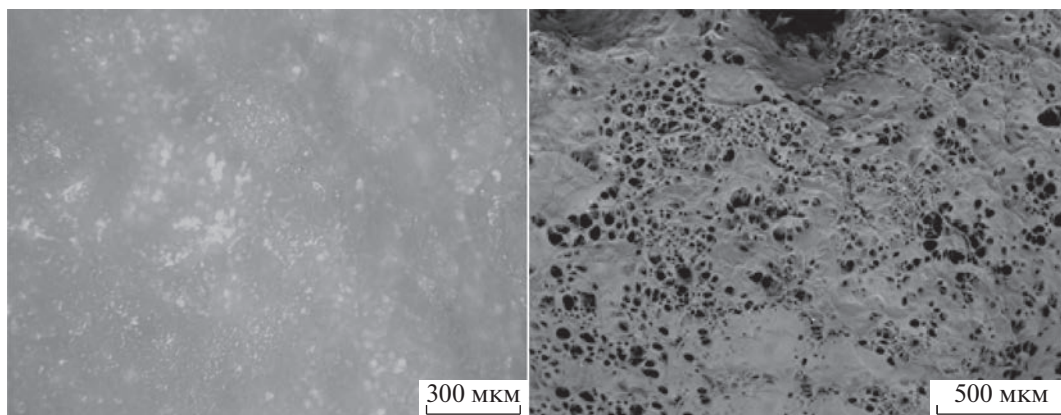


Рис. 2. Структура полученного хитозана: слева – оптический микроскоп, справа – сканирующий электронный микроскоп (СЭМ). То же на рис. 3.

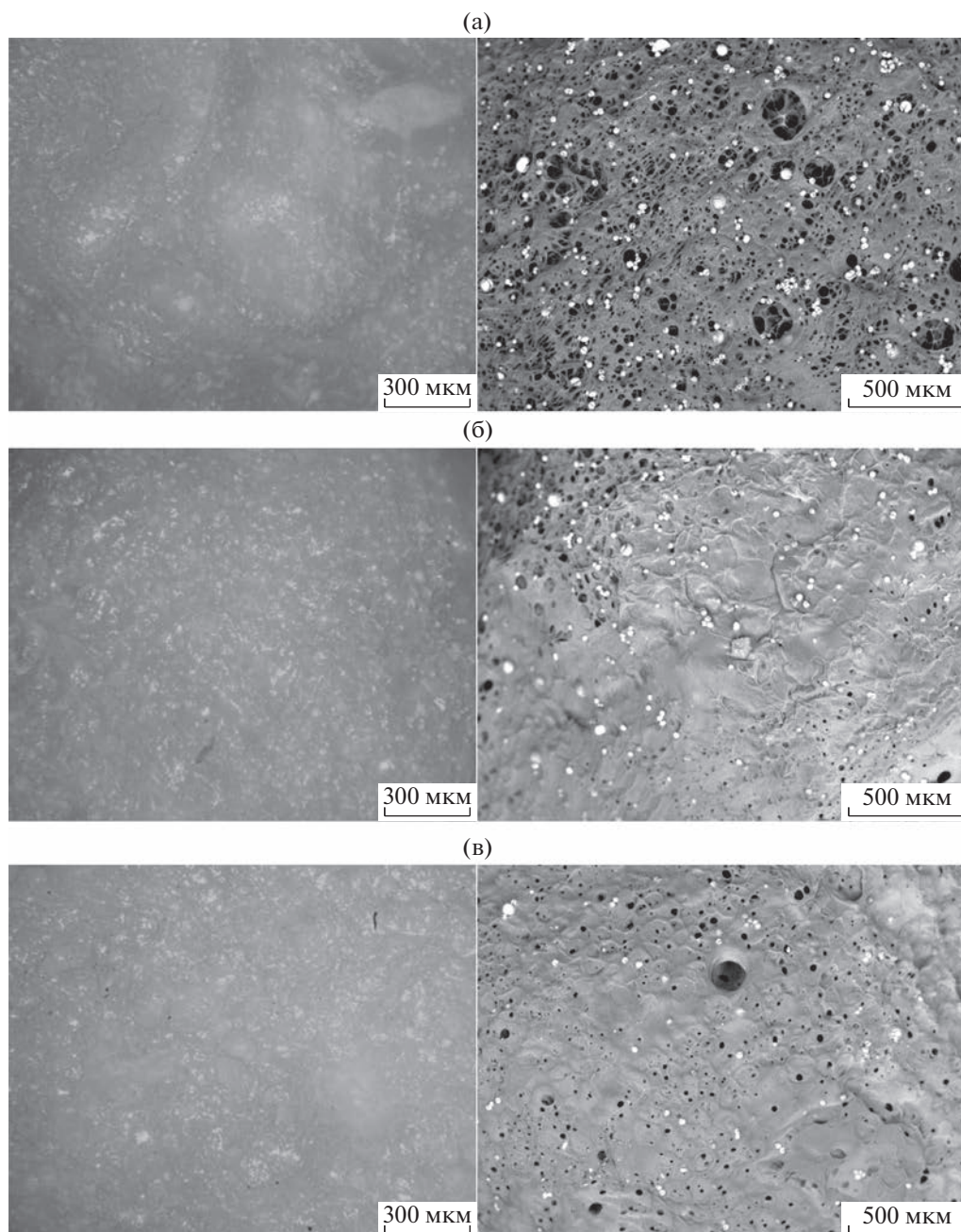


Рис. 3. Структура композиционного материала “хитозан–диоксид титана”, с отношением компонентов: (а) – 3 : 1, (б) – 2 : 1, (в) – 1 : 1.

ния композиционного материала, можно обозначить 2 составляющие, определяющие механизм сопротивления сжатию (механические характеристики): непосредственно материал гранулы (хитозан или хитозан–диоксид титана) и каркас пор, образованных этим материалом. Механизм деформирования гранул можно разделить на 3 этапа. На первом этапе (от 0 до 50–60% деформации при сжатии) работа деформирования переходит в разрушение каркаса пор и незначитель-

ное сжатие материала каркаса. На 2-м этапе (от 50–60 до 65–75% деформации при сжатии) преобладает сжатие материала гранул и остаточное уплотнение пор вплоть до их полного закрытия. Дальнейшая деформация ведет к прессованию материала гранул. Данная зависимость характерна для всех полученных образцов, внесение диоксида титана во всех изученных концентрациях не влияло на этот процесс.

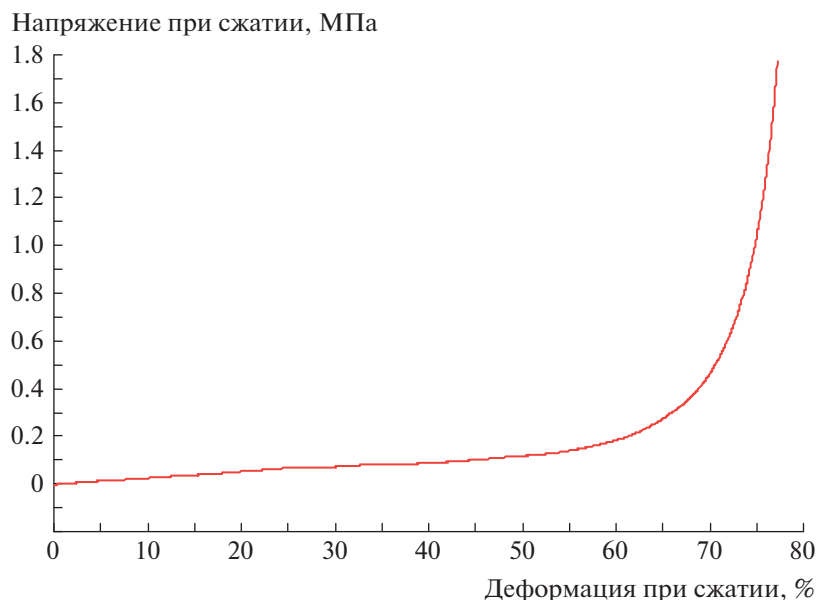


Рис. 4. Диаграмма сжатия композиционного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе рассмотрен способ получения композиционного материала “хитозан–диоксид титана” с различным содержанием диоксида титана. Показана структура полученных образцов композиционного материала. Отмечена пористая структура с равномерным распределением частиц диоксида титана во всех рассмотренных вариантах концентраций диоксида титана.

Введение диоксида титана не приводило к заметному изменению механических свойств при сжатии полученного композиционного материала. Деформация при сжатии достигала порядка 70–75%, после чего начиналось прессование материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stanley N., Mahanty B. Preparation and characterization of biogenic CaCO_3 -reinforced polyvinyl alcohol-alginate hydrogel as controlled-release urea formulation // *Polym. Bull.* 2019. V. 77. P. 529–540.
2. Vishwakarma K., Upadhyay N., Kumar N., Tripathi D.K., Chauhan D.K., Sharma S., Sahi S. Potential applications and avenues of nanotechnology in sustainable agriculture // *Academic Press*. 2018. V. 1. P. 473–500.
3. Babadi F.E., Yunus R., Rashid S.A., Salleh M.M., Ali S. New coating formulation for the slow release of urea using a mixture of gypsum and dolomitic limestone // *Particuology*. 2015. V. 23. P. 62–67.
4. Sim D.H.H., Tan I.A.W., Lim L.L.P., Hameed B.H. Encapsulated biochar-based sustained release fertilizer for precision agriculture. A review // *J. Cleaner Product.* 20 June 2021. V. 303. 127018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127018>
5. Liu R., Lal R. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions // *Sci. Total Environ.* 2015. V. 514. P. 131–139.
6. Dimkpa C.O., Bindraban P.S. Nanofertilizers: new products for the industry? // *J. Agric. Food Chem.* 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02150>
7. Kah M., Kookana R.S., Gogos A., Bucheli T.D. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues // *Nat. Nanotechnol.* 2018. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>
8. Raliya R., Saharan V., Dimkpa C., Biswas P. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives // *J. Agric. Food Chem.* 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178>
9. Sangeeta Chavan, Vishwas Sarangdhar, Vigneshwaran Nandanathangam. Toxicological effects of TiO_2 nanoparticles on plant growth promoting soil bacteria // *Emerg. Contamin.* 2020. V. 6. P. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2020.01.003>
10. Selma M.H., Jawad A.L., Taha Ali A., Salim M.M. Synthesis and characterization of pure and Fe doped TiO_2 thin films for antimicrobial activity // *Optik*. 2017. V. 142. P. 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.05.048>
11. Sreeja S., Shetty K.V. Photocatalytic water disinfection under solar irradiation by Ag@TiO_2 core-shell structured nanoparticles // *Solar Energy*. 2017. V. 157. P. 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.057>
12. Grégori D., Benchenaa I., Chaput F., Thérias S., Gardette J.-L., Léonard D., Guillard C., Parola S. Mechanically stable and photocatalytically active $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

- hybrid films on flexible organic substrates // J. Mater. Chem. 2014. V. 2. P. 20096–20104.
<https://doi.org/10.1039/C4TA03826F>
13. Vladkova T., Angelov O., Stoyanova D., Gospodinova D., Gomes L., Soares A., Mergulhao F., Ivanova I. Magnetron co-sputtered TiO₂/SiO₂/Ag nanocomposite thin coatings inhibiting bacterial adhesion and biofilm formation // Surface Coat. Technol. 2020. V. 384. Iss. 125322.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125322>
 14. Xing Y., Yang H., Guo X., Bi X., Liu X., Xu Q., Wang Q., Li W., Li X., Shui Y., Chen C., Zheng Y. Effect of chitosan/Nano-TiO₂ composite coatings on the postharvest quality and physicochemical characteristics of mango fruits // Sci. Horticult. 2020. V. 263. Iss. 109135.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109135>
 15. González-Saucedo A., Barrera-Necha L.L., Ventura-Aguilar R.I., Correa-Pacheco Z.N., Bautista-Baños S., Hernández-López M. Extension of the postharvest quality of bell pepper by applying nanostructured coatings of chitosan with *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth extract // Postharvest Biol. Technol. 2019. V. 149. P. 74–82.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.11.019>
 16. Waani S.P.T., Irum S., Gul I., Yaqoob K., Khalid M.U., Ali M.A., Manzoor U., Noor T., Ali S., Rizwan M., Arshad M. TiO₂ nanoparticles dose, application method and phosphorous levels influence genotoxicity in Rice (*Oryza sativa* L.), soil enzymatic activities and plant growth // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2021. V. 213. Iss. 111977.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111977>
 17. Bakshi M., Liné C., Bedolla D.E., Stein R.J., Kaegi R., Sarret G., Pradas del Real A.E., Castillo-Michel H., Abhilash P.C., Larue C. Assessing the impacts of sewage sludge amendment containing nano-TiO₂ on tomato plants: A life cycle study // J. Hazard. Material. 2019. V. 369. P. 191–198.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.036>
 18. Ullah S., Adeel M., Zain M., Rizwan M., Irshad M.K., Jilani G., Hameed A., Khan A., Arshad M., Raza A., Baluch M.A., Rui Y. Physiological and biochemical response of wheat (*Triticum aestivum*) to TiO₂ nanoparticles in phosphorous amended soil: A full life cycle study // J. Environ. Manag. 2020. V. 263. Iss. 110365.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110365>

Method of Preparation, Study of the Structure and Mechanical Properties of the Composite Material “Chitosan–Titanium Dioxide” for Agricultural Use

A. S. Baikin^{a, #}, A. A. Melnikov^a, A. V. Mikhailova^{a, b}, M. A. Kaplan^a, E. O. Nasakin^a, K. V. Sergienko^a,
 S. V. Konushkin^a, E. P. Sevostyanova^b, E. V. Stepanova^b, S. V. Zhelezova^b,
 A. P. Glinushkin^b, and M. A. Sevostyanov^{a, b}

^a*Institute of Metallurgy and Materials Science named after. A.A. Baykova RAS
 119332 Moscow, Leninsky Prospekt, 49, Russia*

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

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

Bioprotective materials for agriculture are an important part of the modern world. A wide range of different compounds are used for their development. For example, titanium dioxide, in addition to its protective properties, has a positive effect on the digestibility of nutrients, improves the efficiency of fertilizers and, accordingly, reduces their consumption, which is especially important in the modern world. However, direct injection of titanium dioxide is ineffective due to the processes of its loss. The best option is a prolonged isolation that provides the required concentration of titanium dioxide in the soil for the plant. The introduction of titanium dioxide into the polymer matrix can solve this problem by gradual release. In turn, such a polymer matrix has a number of requirements for their properties. A possible solution may be chitosan – a non-toxic, non-immunogenic, antimicrobial, biologically safe and biodegradable material. The paper considers the preparation of the composite material “chitosan–titanium dioxide” in granular form. The efficiency of a material with mass ratios of chitosan to titanium dioxide of 1 : 1, 2 : 1 and 3 : 1, as well as chitosan without titanium dioxide, has been studied. The structure and mechanical properties of the obtained composite materials are investigated.

Key words: chitosan, titanium dioxide, composite material, agriculture, bioprotector, mechanical properties, structure.

УДК 631.46

РОЛЬ БАКТЕРИЙ РОДА *Pseudomonas* И ИХ МЕТАБОЛИТОВ В БИОКОНТРОЛЕ ФИТОПАТОГЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ¹

© 2023 г. Т. М. Сидорова^{1,*}, В. В. Аллахвердян¹, А. М. Асатурова¹¹Федеральный научный центр биологической защиты растений

350039 Краснодар, а/я 39, Россия

*E-mail: 0166505@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2022 г.

После доработки 27.12.2022 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Обобщены и проанализированы современные знания о перспективности применения бактерий рода *Pseudomonas* в качестве продуцентов эффективных микробиологических препаратов для биоконтроля фитопатогенных организмов. Ризосферные псевдомонады являются потенциальными объектами агробиотехнологии в связи с наличием у них необходимых для биоконтроля и фитостимуляции физиолого-биохимических особенностей. К этим особенностям относятся толерантность к активным формам кислорода, хемотаксис в отношении корневых экссудатов, биосинтез сидерофоров и антибиотических метаболитов различной природы. Представители рода *Pseudomonas* известны своим большим метаболическим разнообразием, что позволяет им колонизировать широкий спектр экологических ниш, включая ризосферу. Виды *Pseudomonas*, изолированные из ризосферы, обладают более широкой катаболической активностью, чем изолированные из основной массы почвы, особенно в отношении определенных сахаров, полиолов и аминокислот, которые можно найти в корневых экссудатах. Широкое метаболическое разнообразие позволяет бактериям получить повсеместное распространение, образуя защитные биопленки и колонизируя различные экологические ниши. При этом улучшаются водоудерживающая способность, плодородие и пористость почвы, а также условия минерального питания растений за счет повышения доступности N, P, K и Fe. В работе подробно описаны основные биологически активные метаболиты, продуцируемые псевдомонадами и их роль в подавлении фитопатогенов и фитостимуляции. В исследованиях использована материально-техническая база УНУ «Технологическая линия для получения микробиологических средств защиты растений нового поколения» (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/671367/>).

Ключевые слова: экологическая ниша, ризосфера, ризобактерии, бактерии рода *Pseudomonas*, биологически активные соединения, биоконтроль.

DOI: 10.31857/S0002188123050071, **EDN:** URYTYX

ВВЕДЕНИЕ

Использование полезных микробов для роста урожайности растений и для защиты от вредных организмов представляет собой многообещающий инструмент, который может ответить на вызовы современного сельского хозяйства. Хорошо продуманное внесение естественных микроорганизмов и органических добавок может заменить, по крайней мере, частично химические удобрения, инсектициды и фунгициды. Микробы, способствующие росту растений (PGPR), являются важными детерминантами плодородия почвы и здоровья растений, они обладают потенциалом

для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и их питательных качеств [1, 2].

PGPR защищают от фитопатогенов с помощью множества механизмов, включая способность получать конкурентное преимущество в отношении питательных веществ и микроэлементов и производить один или несколько антибиотиков, эффективных против патогенов [3–5]. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* являются потенциальными объектами агробиотехнологии, поскольку обладают целым рядом физиолого-биохимических особенностей, необходимых для биоконтроля фитопатогенов и фитостимуляции [6]. Отдельные штаммы псевдомонад способны активно колонизировать ризосферу растений различных систематических групп, продуцировать фитогормоны (ауксины и цитокинины), антибиотически активные соединения

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности FGRN-2022-0005.

различной природы (феназины, флороглюцины, пиолитеорин, пирролнитрин, бактериоцины), индуцировать иммунный ответ растений и защищать растения от стрессовых факторов. Псевдомонады имеют короткое время генерации, высокую скорость роста по сравнению с другими ризосферными бактериями и легко культивируются в лабораторных условиях. Цель работы — обобщить современные знания о перспективах использования бактерий рода *Pseudomonas* в качестве продуцентов эффективных биопрепаратов для защиты растений от болезней и экологических стрессов.

БАКТЕРИИ *PSEUDOMONAS* КАК ПРОДУЦЕНТЫ ЭФФЕКТИВНЫХ БИОПРЕПАРАТОВ

На основе бактерий рода *Pseudomonas* разрабатывают биопрепараты, обладающие высокой биологической эффективностью (65–88%) против целого ряда заболеваний растений, включая мучнистую росу, фитофтороз, паршу, ризоктониоз, гельминтоспориоз, фузариозы, слизистый и сосудистый бактериоз и т.п. [6]. Применение биопрепаратов на основе природных бактерий-антагонистов не вызывает нарушений в экосистеме, а их действие на почвенные фитопатогены является специфичным и пролонгированным за счет способности штаммов PGPR колонизовать корни растений.

Многие штаммы *Pseudomonas* выделены из окружающей среды, связанной с растениями, и описаны как ризобактерии, способствующие росту растений и минимизирующие воздействие фитопатогенов. Чтобы проявить свои полезные свойства для растений, бактерии должны быть конкурентоспособными и способными колонизировать поверхность тканей растений. Формирование биопленки полезными, связанными с растениями *Pseudomonas* играет важную роль как для растений, так и для бактерий. Биопленки, производимые ризосферными бактериями, усиливают агрегацию почвы, что улучшает водоудерживающую способность, плодородие и пористость почвы.

По способности штаммов к подавлению роста растительных патогенов отобраны штаммы-антагонисты, которые относятся к видам *P. chlororaphis*, *P. fluorescens*, *P. putida*, *P. brassicacearum*, *P. protegens* и *P. lurida* [6, 7]. В культуральной жидкости отдельных изолятов обнаружены антигрибные антибиотики феназинового ряда в различных сочетаниях. Помимо продукции антибиотиков штаммы *P. chlororaphis* (P4-1, Or3-3, Kr31, IG1) и

P. putida O9-10 выделяют цианид водорода. Штамм *P. chlororaphis* PA23 способен подавлять гниль стеблей канолы, вызываемую грибным патогеном *Sclerotinia sclerotiorum*, как в тепличных, так и в полевых исследованиях. Биоконтроль ризобактерий *P. chlororaphis* PCL1606 обладает способностью защищать растения авокадо от белой корневой гнили, вызываемой фитопатогенным грибом *Rosellinia necatrix*. Ряд соединений, включая пирролнитрин, феназин, цианистый водород (HCN), протеазы, липазы и сидерофоры, вносят вклад в способность бактерии *P. fluorescens* BBc6R8 подавлять *Streptomyces ambifaciens* ATCC23877 [8–10]. Продуцирующие феназин псевдомонады, представляющие 4 основных вида (*P. aridus*, *P. cerealis*, *P. Orientalis* и *P. synxantha*), подавляют возбудитель корневой гнили пшеницы *Rhizoctonia* при применении для обработки семян [11]. Бактерии *P. fluorescens*, *P. parafulva* и *B. velezensis* рассматриваются как потенциальные биоагенты для борьбы с заболеванием мягкой гнилью, вызываемым *D. zeae* [12]. Фильтрат культуры штамма *P. fluorescens* WH6, выделенный из ризосферы пшеницы, задерживает прорастание ряда видов сорных трав, в том числе мятлика однолетнего (*Poa annua* L.), подавляет рост бактериального патогена растений *Erwinia amylovora*, возбудителя гниения садовых культур [13–15]. Штамм *P. brassicacearum* 3Re2-7 выбран как успешный для биоконтроля почвенных патогенов, таких как *R. solani*, на салате и сахарной свекле [16].

ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА РАСТЕНИЯ

Большинство растений в природе находится в ассоциативном взаимодействии с полезной ризо- и филлосферной микрофлорой. Почва ризосферы растений является нишей для сложных микробных сообществ, в которых микроорганизмы часто участвуют во внутривидовых, а также межвидовых и межцарских сигнальных сетях. Некоторые члены этих сетей могут улучшить здоровье растений благодаря важному разнообразию биоактивных вторичных метаболитов. По сравнению с филлосферой, изменения окружающей среды, происходящие в ризосфере, слабые и буферные. Тем не менее, ризосфера не считается однородной и стабильной средой, поскольку условия могут резко меняться [17]. Ризодепозиты, выделяемые растениями, особенно корневые экссудаты, предлагают микробиому ризосферы разнообразные субстраты для развития, такие как органические кислоты, углеводы, жирные кислоты, аминокислоты и белки [18]. Механизмы положитель-

ного эффекта бактерий на растения можно условно разделить на 2 типа: 1 — прямая (непосредственная) стимуляция роста растений за счет синтеза фитогормонов и улучшения минерального питания растений; 2 — опосредованная стимуляция роста растений за счет вытеснения и подавления развития почвенных фитопатогенных грибов и бактерий, угнетающих рост растений [19, 20].

Бактерии рода *Pseudomonas* известны своим большим метаболическим разнообразием, что позволяет им колонизировать широкий спектр экологических ниш, включая ризосферу. Существует сложная модуляция вторичного метаболизма бактерий в соответствии с комбинацией генотипов растений и штаммов бактерий [21, 22]. Контроль патогенов и стимулирование роста растений тесно связан со способностью бактерий *Pseudomonas* конкурентно колонизировать ризосферу и сохраняться в ней, что определяется как ризокомпетентность [18]. Бактерии рода *Pseudomonas* составляют значительную долю микробного сообщества эндофитов, которые имеют преимущество перед бактериями, населяющими ризосферу и филлоплану, т.к. находятся в непосредственном “контакте” с клетками растения [23, 24].

Микроорганизмы взаимодействуют с растениями, способствуя их росту, что стимулирует микробное сообщество образованием экссудатов. Органический углерод, выделяемый корнями растений, стимулирует рост микробных сообществ в ризосфере, которые, в свою очередь, производят клейкие внеклеточные полимерные вещества, состоящие в основном из полисахаридов, белков и ДНК, способствуют агрегации почвы и увеличивают прилипание почвы к корням. Производство полисахаридов в ризосфере растений защищает окружающую среду от высыхания и изменений водного потенциала, увеличивая поглощение питательных веществ растениями и способствуя их росту, защищает саженцы от стресса засухи и стимулирует корневые экссудаты. Улучшение агрегации и структуры почвы улучшает рост проростков, поскольку способствует эффективному поглощению питательных веществ и воды. Присутствие бактерий, образующих биопленку, или инокуляция штаммами бактерий, продуцирующими внеклеточные полимерные вещества, на эродированных землях может в значительной степени помочь в поддержании архитектуры почвы и сделать эти земли плодородными для сельского хозяйства [25, 26]. Эти бактерии также оптимизируют условия минерального питания растений, т.к. инокуляция растений полезными микробами может увеличить доступность пита-

тельных веществ, таких как N, P, K и Fe. Их используют в качестве основы биологических средств регуляции роста и защиты растений, рассматривают как перспективные агенты биоконтроля [27, 28].

Значительное повышение уровня фенилаланинаммиаклиазы, пероксидазы, β -1,3-глюканазы и хитиназы, накопление в листьях лигнина зарегистрировано у растений, обработанных *P. fluorescens* UBSPF-10. Показан результат противогрибковой активности производных феназина, который вырабатывается флуоресцентными псевдомонадами для борьбы с поражением оболочек риса. *Pseudomonas* sp. CMR12a способен вызывать системную резистентность к *Magnaporthe oryzae* на рисе и к патогену *Rhizoctonia solani* AG2-2 на фасоли [29, 30]. Ростстимулирующие свойства выявлены у лабораторных фунгицидных биопрепаратов на основе *P. chlororaphis* 245 F [31]. *P. simiae* PICF7 (ранее *P. fluorescens* PICF7) — естественный обитатель ризосферы оливок, способный эндофитически колонизировать ткани корня, является наиболее охарактеризованным эффективным агентом биоконтроля против *V. dahliae* VWO [32, 33]. Штамм *P. putida* 1A00316 может вызывать системную устойчивость томатов за счет увеличения активности 3-х защитных ферментов: фенилаланинаммиаклиазы, полифенолоксидазы и пероксидазы в растениях [34]. Бактерия *P. aurantiaca* SR1 является стимулятором роста растений люцерны, пшеницы, сои, кукурузы, рожкового дерева, сахарного тростника, а также показывает противогрибную активность против нескольких патогенных штаммов, в том числе *Fusarium*, *Pythium*, *Rhizoctonia* и *Sclerotium* spp. [35]. Активацию корневого иммунитета полезными микробами наблюдали во многих ассоциациях корень—микроб. *Pseudomonas simiae* WCS417 и *Pseudomonas capeferrum* WCS358, запускают иммунные ответы в корнях *Arabidopsis* и клетках табака [36].

РОЛЬ БИОПЛЕНКИ ДЛЯ БИОКОНТРОЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ БАКТЕРИЙ *Pseudomonas*

Биопленки — это ассоциированные с поверхностью сообщества микроорганизмов, заключенные в полимерную матрицу собственного производства. Фиксированный образ жизни дает бактериям множество защитных преимуществ, позволяя бактериям оставаться в благоприятной экологической нише или в среде хозяина. По сравнению со свободно плавающими бактериями биопленки лучше приспособлены к тому, чтобы противостоять

ять лишению питательных веществ, изменениям рН, кислородным радикалам, биоцидам и антимикробным агентам. Адаптация к сидячему образу жизни совпадает с изменением экспрессии поверхностных молекул, использования питательных веществ и факторов вирулентности, а также устойчивости к иммунной системе и противомикробным агентам [37].

Способность образовывать биопленку является преимуществом для микроорганизмов, позволяющих им быть конкурентоспособными в ризосфере. Формирование биопленок — это динамичный процесс, который зависит от множества биотических и абиотических факторов, таких как доступность питательных веществ, секреция внеклеточного материала и социальная конкуренция. Сравнение биопленок и условий планктона показало, что бактериальный образ жизни является ключевым фактором, влияющим на метаболитом *Pseudomonas*.

Образование биопленок может иметь отношение к образу жизни *P. chlororaphis* PcPCL1606, что может определяться некоторыми предполагаемыми компонентами внеклеточного матрикса в архитектуре биопленки и биоуправляемой активностью этой бактерии [38]. Состав внеклеточного матрикса может варьировать между штаммами и является сложным, включая липополисахариды, гликолипиды, липиды, белки или пептиды, нуклеиновые кислоты и некоторые вторичные метаболиты. Распространение клеток может происходить в ответ на различные условия окружающей среды, что позволяет бактериям из колонизированных корней растений перемещаться в потоке поровых вод и посредством хемотаксиса к другим местам колонизации. Регуляторные системы, которые управляют образованием биопленок, таким образом, играют важную роль во взаимодействии бактерий с их растениями-хозяевами.

Антимикробные феназины способствуют образованию биопленок у *P. chlororaphis* 30-84. Экзополимерные вещества биопленок защищают бактериальные клетки от физических и механических нагрузок (например, высыхания), играя важную роль в их выживании и устойчивости в естественных средах [39, 40].

РОЛЬ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МЕТАБОЛИТОВ В БИОКОНТРОЛЕ ФИТОПАТОГЕНОВ

Виды *Pseudomonas* являются наиболее универсальными из всех известных бактерий с точки зрения метаболической гибкости [41–43]. У бак-

терий рода *Pseudomonas* обнаружено более 300 различных антимикробных соединений, более 100 из которых — антибиотики ароматического строения. Популяции флуоресцентных *Pseudomonas* spp., достигнув определенного порога, обладают способностью продуцировать несколько антибиотиков, а также другие вторичные метаболиты, которые могут воздействовать на широкий спектр патогенов растений и обеспечивать возможность биологического контроля. Способность бактерий *P. putida* продуцировать биологически активные метаболиты изучена с использованием современных методик [44].

Феназины представляют собой окислительно-восстановительные азотсодержащие гетероциклические молекулы, способные подавлять многие патогены растений. Антимикробная активность и признаки вирулентности, связанные с производством феназина, обусловлены их способностью генерировать активные формы кислорода. Феназины также вносят значительный вклад в образ жизни продуцирующих бактерий, например, способствуя образованию и росту биопленок в бескислородных условиях. Основные феназины, продуцируемые *Pseudomonas* spp., представляют собой феназин-1-карбоновую кислоту, 2-гидроксифеназин-1-карбоновую кислоту, 2-гидроксифеназин феназин-1-карбоксамид. Продукция феназина напрямую участвует в конкурентной колонизации ризосферы [45, 46].

Показано, что феназины проявляют антибиотическую активность широкого спектра действия по отношению ко многим грибным, бактериальным и оомицетным патогенам растений, включая *G. graminis* var. *tritici*, *R. solani*, *F. oxysporum* f. sp. *radicis* — *lycopersici*, *S. scabies*, *Pythium* spp. и *P. infestans* [47–50]. Продукция феназина важна для компетентности продуцентов ризосферы, способствует образованию биопленок посредством продукции внеклеточного матрикса [51] и может повлиять на доступность металлов или других питательных веществ. Псевдомонады, имеющие гены, необходимые для производства феназина, преобладают в ризосферах пшеницы, выращиваемой в условиях засушливых земель [52].

Интенсивность пигментации колоний штаммов *P. chlororaphis* при выращивании на богатой среде способствует простоте их выделения и обнаружения во время исследований. Эта пигментация происходит из-за продукции трехкольцевых азотсодержащих феназинов, которые обладают антимикробными свойствами и влияют на передачу сигналов в клетке [53].

Циклические липопептиды представляют собой очень разнообразные поверхностно-активные вещества с антимикробной активностью.

Они содержат циклический олигопептид (8–25 аминокислот) и линейную жирную кислоту [54]. На сегодняшний день идентифицировано около 100 циклических липопептидов, что стало возможным благодаря полногеномному секвенированию многих штаммов *Pseudomonas* в сочетании с разработкой мощных инструментов биоинформационного анализа [55, 56]. Циклические липопептиды продуцируются нерибосомными пептидными синтетазами, а их антимикробная активность проявляется в нарушении мембран и образовании пор клеточных стенок фитопатогенных микроорганизмов, что обусловлено их амфифильной природой. Подобно феназинам, роль циклических липопептидов выходит за рамки ингибирования микробов: они могут по-разному влиять на формирование и распространение биопленок в зависимости от продуцируемого липопептида [57].

Рамнолипиды в основном производятся *P. aeruginosa*, состоят из β -гидроксигирных кислот, связанных с остатками рамнозы. Рамнолипиды обладают антибактериальными, противогрибковыми и противовирусными свойствами. Они важны для подвижности, межклеточных взаимодействий, клеточной дифференциации и образования водных каналов [58].

Поликетиды представляют собой структурно и функционально разнообразный класс вторичных метаболитов, продуцируемых бактериями и грибами, с антимикробными, терапевтическими и фитотоксическими свойствами. Биосинтез поликетидов аналогичен биосинтезу жирных кислот и опосредуется поликетидсинтазами. Полезные для растений *Pseudomonas* продуцируют 2,4-диацетилфлороглюцин, мупироцин и пиолуторин. 2,4-диацетилфлороглюцин играет важную роль в защите пшеницы от *G. graminis* var. *tritici* [59].

Бактериоцины — это антибактериальные пептиды и белки, которые включают широкий спектр структурно и функционально разнообразных соединений [58]. *Pseudomonas* spp. синтезируют лектин-подобные бактериоцины, микроцины и пиоцины, влияющие на выживаемость клеток фитопатогенных бактерий посредством различных способов действия, таких как нуклеазная активность против ДНК, тРНК и рРНК, дезорганизация клеточной стенки или деполяризация мембраны за счет образования пор.

Трополоны — небензоидные семичленные ароматические соединения, содержащие карбонильную группу [50, 60]. Бактериальные трополы, такие как трополон, троподитиетиновая кислота или розообактициды, играют решающую роль в различных симбиотических взаимодействиях как факторы вирулентности, антибиоти-

ки, альгициды или сигналы кворума. В первую очередь они были описаны у грибов и растений, но также и у некоторых штаммов *Pseudomonas*, особенно из-за их интересной антибиотической и хелатирующей железом активной активности. Механизм, лежащий в основе противогрибной активности трополона, также может быть прямым ингибированием эукариотических биядерных металлоферментов, содержащих двухвалентные ионы, такие как Cu^{2+} , Mg^{2+} и Zn^{2+} . Открытие обитающего в почве штамма *Pseudomonas*, производящего трополон, показывает, что биосинтез этого соединения может быть важным признаком выживания бактерий в почве и ризосфере.

Противогрибный метаболит пирролнитрин, биосинтезируемый в *P. chlororaphis* G05, играет существенную роль в подавлении роста *F. graminearum* [61]. Бактерии *Pseudomonas* sp. J1TVK продуцируют метаболит голубовато-зеленого цвета, показывающий антибактериальную активность [62]. Бактерии *P. fluorescens* BBc6R8 продуцируют сидерофоры энантиопиохелин и пиовердин, а также биосурфактант вискозин [63]. *P. fluorescens* NAIMCC-B-00361 продуцирует набор антибиотиков, включая такие соединения, как 2,4-диацетилфлороглюцинол, феназин, пирролнитрин пиолутеорин, а также антибиотики-биосурфактанты [64]. *P. resinovorans* WMT16-1-1, *P. putida* WMC16-1-1, WMC16-2-5, *P. fluorescens* WMC16-1-8 значительно ингибируют рост мицелия *F. oxysporum* f. sp. *niveum*.

Летучие органические соединения, производимые микробами, защищают растения за счет диффузии газов [65]. Это молекулы с низким молекулярным весом, которые обычно содержат менее 12 атомов углерода и могут быть связаны с другими элементами, такими как азот, сера, бром, кислород, фтор и хлор. Цианистый водород (HCN) — очень простое летучее соединение, образованное из глицина, является еще одной частью токсичного арсенала группы *P. chlororaphis*. Нематоцидная активность изолята *P. chlororaphis* PA23 коррелирует как с пирролнитрином, так и с HCN. Изолят *P. putida* также убивает нематод с помощью нескольких механизмов, включающих летучие вещества [66]. Кроме того, Flury с соавт. [67] показали, что изолят *P. chlororaphis* PCL 1391 продуцирует HCN. Продукция HCN изолятом *P. chlororaphis* 06 вызывает гибель клеток как у нематод [68], так и у нимф тлей [69]. Сообщается об успешной борьбе с нематодами, поражающими корни, с помощью *P. chlororaphis* Sm3 на клубнике, выращиваемой в теплицах [70].

Выявлено, что летучие органические соединения играют важную роль в различных процессах, посредством которых происходит развитие растений, индукция системной устойчивости и пере-

Таблица 1. Российские биопрепараты для растениеводства на основе псевдомонад [76]

Название	Действующее начало	Назначение	Действие	Обрабатываемая культура
Ризоплан	<i>P. fluorescens</i> AP-33	Биофунгицид	Подавляет развитие возбудителей гельминтоспориозной и фузариозной корневой гнили, различных видов пятнистости, бурой ржавчины, септориоза, мучнистой росы, церкоспороза, пероноспороза, ризоктониоза, плесневения семян, фитофтороза, черной ножки, парши и монилиоза	Зерновые, овощные, плодово-ягодные
Псевдобактерин-2	<i>P. aureofaciens</i> BS 1393	Биопестициды	Подавляет развитие возбудителей корневых гнилей различной этиологии, бурой ржавчины, бурой пятнистости, септориоза, мучнистой росы, церкоспороза, ризоктониоза, фитофтороза	Зерновые, овощные (в том числе культуры защищенного грунта)
Псевдобактерин-3	<i>P. aureofaciens</i> ВКМ В-2391Д			
Агат-25К	Метаболиты штамма <i>P. aureofaciens</i> Н16 (ИУК, аланин и глутаминовая кислота)	Регулятор роста растений	Усиливает рост, устойчивость к болезням и неблагоприятным факторам среды, а также повышает урожайность	Овощные, зерновые, бобовые, ягодные, цветочно-декоративные, хвойные
Биорам	Смесь 3-х штаммов <i>P. fluorescens</i> 7Г, 7Г2К, 17-2	Биопестицид	Подавляет развитие возбудителей гельминтоспориозных и фузариозных корневых гнилей, ризоктониоза, сосудистого и слизистого бактериозов	Зерновые, овощные
Елена	<i>P. aureofaciens</i> ИБ 51	Биопестицид	Подавляет развитие возбудителей фузариозной и гельминтоспориозной корневой гнили, плесневения семян	Зерновые
Гаупсин	Смесь двух штаммов <i>P. chlororaphis</i> subsp. <i>aureofaciens</i>	Биопестицид, биоинсектицид	Обладает антигрибной, энтомопатогенной активностью и оказывает положительное влияние на урожайность и качество растениеводческой продукции	Овощные, зерновые, плодово-ягодные, цветочно-декоративные

дача химических сигналов в растениях [71, 72]. Синтез летучих органических соединений, наблюдаемый у изолятов *P. fluorescens* [73], предполагает, что это является общей чертой среди псевдомонад, ассоциированных с растениями.

Сидерофоры — это небольшие органические молекулы, вырабатываемые микроорганизмами в условиях ограничения содержания железа, увеличивают способность усваивать железо. *P. fluorescens* секретирует гидроксамат сидерофор, феррибактин. Большинство гидроксаматных групп состоит из C (= O) N-(OH) R, где R представляет собой либо аминокислоту, либо ее производное. Хотя железо является микронутриентом, оно не-

обходимо для биосинтеза хлорофилла, окислительно-восстановительных реакций и некоторых важных физиологических процессов в растениях [74]. Различные виды *Pseudomonas* могут усиливать рост растений, продуцируя пиовердин. Пиовердины могут изолировать железо из ризосферы и сделать его недоступным для питания ризосферных грибов, продуцирующих менее сильные сидерофоры. Различные типы сидерофоров способствуют росту нескольких видов растений и увеличивают их урожай за счет увеличения поглощения Fe растениями. Сидерофоры действуют как потенциальный агент биоконтроля против вредных фитопатогенов и обладают способностью заменять опасные пестициды.

Таблица 2. Коммерческие биопрепараты иностранного производства на основе псевдомонад для защиты растений от болезней [76]

Название биопрепарата	Действующее начало	Объект воздействия	Производитель
Conquer, Victum	<i>P. fluorescens</i>	<i>P. tolaasii</i>	Mauri Foods, Австралия
Dagger G	<i>P. fluorescens</i>	<i>Rhizoctonia</i> spp., <i>Pythium</i> spp.	Ecogen, США
BlightBan A506	<i>P. fluorescens</i> A506	<i>Erwinia amylovora</i>	Nufarm Americas Inc., США
BioCoat	<i>P. fluorescens</i> WCS374r	<i>F. oxysporum</i>	S&G seeds, BV, Нидерланды
Proradix	<i>Pseudomonas</i> sp. DSMZ 13134	<i>Rhynchosporium secalis</i> <i>Gaeumannomyces graminis</i>	Sourcon Padena, GmbH & Co. KG, Германия
Серия Bio-Save	<i>P. syringae</i> ECS-100	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>Geotrichum candidum</i>	Eco Science Corp, США
Cedomon, Cerall	<i>P. chlororaphis</i> MA 342	<i>Fusarium</i> spp., <i>Pyrenophora teres</i> , <i>P. graminea</i> , <i>Tilletia caries</i> , <i>Septoria nodorum</i>	BioAgri AB, Швеция
AtEze	<i>P. chlororaphis</i> 63-28	<i>Pythium</i> spp., <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>F. oxysporum</i>	Turf Science Laboratories, США
Spot-Less	<i>P. aureofaciens</i> Tx-1	<i>Sclerotinia homeocarpa</i> , <i>Colletotrichum graminicola</i> , <i>Pythium aphanidermatum</i> , <i>Microdochium nivale</i>	Turf Science Laboratories, США

Плотно связываясь с железом и снижая его биодоступность для патогенов растений, они способствуют их уничтожению. Пиовердиновые сидерофоры, продуцируемые *Pseudomonas*, участвуют в борьбе с болезнями увядания картофеля, вызываемыми *F. oxysporum*. Пиовердин также активен против *Gaeumannomyces graminis* [74].

Литические ферменты участвуют в деградации клеточных стенок фитопатогенных микроорганизмов, что является одним из наиболее известных механизмов биологического контроля грибных патогенов путем воздействия на их клеточную стенку, вызывая лизис и гибель клеток [4, 75]. Среди наиболее изученных литических ферментов, продуцируемых агентами биологической борьбы, являются хитиназы, целлюлазы, протеазы и β -1,3-глюканазы, которые модифицируют, перфорируют и разрушают структуру клеточной стенки [75]. Известно о роли внеклеточной хитиназы, выделенной из *P. aeruginosa*, в биологическом контроле над *Xanthomonas campestris*., вызывающей болезнь черной гнили. Штаммы *Pseudomonas*, выделенные из ризосферы нута, продуцируют хитиназы и целлюлазы с антагонистической активностью против *R. solani* и *Pythium aphanidermatum* [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биологическая защита растений от вредных организмов набирает все большие обороты в связи с тем, что при условиях повышения антропогенной нагрузки на окружающую среду необхо-

димо обеспечить безопасность продуктов питания. Представители бактерий рода *Pseudomonas*, благодаря их повсеместному распространению, широкому метаболическому разнообразию, наличию необходимых для биоконтроля фитопатогенов и фитостимуляции физиолого-биохимических особенностей, являются перспективными объектами для разработки эффективных биопрепаратов. Определенные штаммы псевдомонад способны активно колонизировать ризосферу растений различных систематических групп, продуцировать фитогормоны, антибиотически активные соединения различной природы (феназины, флороглюцины, пиолутерин, пирролнитрин, бактериоцины), индуцировать иммунный ответ растений и защищать растения от стрессовых факторов. Бактерии рода *Pseudomonas* составляют значительную долю микробного сообщества эндофитов. Псевдомонады имеют короткое время генерации, высокую скорость роста по сравнению с другими ризосферными бактериями, легко культивируются в лабораторных условиях [7–10]. Во всем мире активно выделяют все новые штаммы бактерий рода *Pseudomonas*, исследуют их физиолого-биохимические свойства, которые необходимы для продуцента эффективных биопестицидов. Нам показалось логичным привести здесь примеры наиболее известных отечественных и зарубежных биопрепаратов для растениеводства на основе псевдомонад и их метаболитов (табл. 1, 2) [76].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hu J., Wei Z., Weidmer S., Friman V.-P., Xu Y.-C., Shen Q.-R., Jousset A. Probiotic *Pseudomonas* communities enhance plant growth and nutrient assimilation via diversity-mediated ecosystem functioning // *Soil Biol. Biochem.* 2017. V. 113. P. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.05.029>
2. Bevivino A. Field microbial application to foster food quality and safety // SIMBA Project. 2020. Available online. <http://simbaproject.eu/field-microbial-application-to-foster-food-quality-and-safety/> (accessed on 5 June 2020)
3. Awolope O.K., O'Driscoll N.H., Di Salvo A., Lamb A.J. De novo genome assembly and analysis unveil biosynthetic and metabolic potentials of *Pseudomonas fragi* A13BB // *BMC Genomic Data.* 2021. V. 22. P. 15 <https://doi.org/10.1186/s12863-021-00969-0>
4. Luzmaria R. Morales-CedenoMa, del CarmenOrozco-MosquedaPedro D., Loeza-LaraFannie I., Parra-CotaSergio de los Santos-Villalobos, GustavoSantoyoSharma. Plant growth-promoting agents of pre- and post-harvest diseases:fundamentals, methods of application and future perspectives // *Microbiol. Res.* 2021. V. 242. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126612>
5. Gouda S., Kerry R.G., Das G., Paramithiotis S., Shin H.-S., Patra J.K. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture // *Microbiol. Res.* 2018. V. 206. P. 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
6. Анохина Т.О., Сиунова Т.В., Сизова О.И., Захарченко Н.С., Кочетков В.В. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробиотехнологиях // *Агрохимия.* 2018. V. 10. P. 54–66. <https://doi.org/10.1134/S0002188118100034>
7. Mikiciński A., Sobiczewski P., Puławska J., Malusa E. Antagonistic potential of *Pseudomonas graminis* 49M against *Erwinia amylovora*, the causal agent of fire blight // *Arch. Microbiol.* 2016. V. 198. № 6. P. 531–539.
8. Nandi M., Selin C., Brawerman G., Fernando W.G.D., de Kievit T.R. The global regulator ANR is essential for *Pseudomonas chlororaphis* strain PA23 biocontrol // *Microbiology.* 2016. V. 162. P. 12. <https://doi.org/10.1099/mic.0.000391>
9. Polonio A., Vida C., de Vicente A., Cazorla F.M. Impact of motility and chemotaxis features of the rhizobacterium *Pseudomonas chlororaphis* PCL1606 on its biocontrol of avocado white root rot // *Microbiol.* 2017. V. 20. P. 95–104. <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.289>
10. Arrebola E., Tienda S., Vida C., de Vicente A., Cazorla F.M. Fitness features involved in the biocontrol interaction of *Pseudomonas chlororaphis* with host plants: the case study of PcPCL1606 // *Front. Microbiol.* 2019. V. 10. P. 719. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00719>
11. Jaaffar A.K.M., Parejko J.A., Timothy C., Paulitz T.C., WelleD.M., Thomashow L.S. Sensitivity of *Rhizoctonia* isolates to phenazine-1-carboxylic acid and biological control by phenazine-producing *Pseudomonas* spp. // *Phytopathology.* 2017. V. 107. P. 692–703. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-16-0257-R>
12. Li J., Hu M., Xue Y., Chen X., Lu G., Zhang L., Zhou J. Screening, identification and efficacy evaluation of antagonistic bacteria for biocontrol of soft rot disease caused by *Dickeya zeae* // *Microorganisms.* 2020. V. 8. № 5. P. 697. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050697>
13. Okrent R.A., Trippe K.M., Maselko M., Maning V. Functional analysis of a biosynthetic cluster essential for production of 4-formylaminoxyvinylglycine, a germination-arrest factor from *Pseudomonas fluorescens* WH6 // *Microbiology.* 2017. V. 163. P. 207–217. <https://doi.org/10.1099/mic.0.000418>
14. Duke K.A., Becker M.G., Girard I.J., Millar J.L., Fernando W.D., Belmonte M.F., de Kievit T.R. The biocontrol agent *Pseudomonas chlororaphis* PA23 primes *Brassica napus* defenses through distinct gene networks // *BMC Genomics.* 2017. V. 18. № 1. P. 467. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-3848-6>
15. Garrido-Sanz D., Arrebola E., Martínez-Granero F., García-Méndez S., Muriel C., Blanco-Romero E. Classification of isolates from the *Pseudomonas fluorescens* complex into phylogenomic groups based in group-specific markers // *Front. Microbiol.* 2017. V. 8. P. 413. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00413>
16. Nelkner J., Tejerizo G.T., Hassa J., Lin T.W., Witte J., Verwaaijen B., Winkler A., Bunk B., Spröer C., Overmann J., Grosch R., Pühler A. and Schlüter A. Genetic potential of the biocontrol agent *Pseudomonas brassicae-arum* (formerly *P. trivialis*) 3Re 2-7 unraveled by genome sequencing and mining, comparative genomics and transcriptomics // *Genes.* 2019. V. 10. P. 601. <https://doi.org/10.3390/genes10080601>
17. Dong C.J., Wang L.L., Li Q., Shang Q.M. Bacterial communities in the rhizosphere, phyllosphere and endosphere of tomato plants // *PLoS ONE.* 2019. V. 14. e0223847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223847>
18. Zboralski A., Filion M. Genetic factors involved in rhizosphere colonization by phytobeneficial *Pseudomonas* spp. // *Computat. Structur. Biotechnol. J.* 2020. V. 18. P. 3539–3554. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.11.025>
19. Сиунова Т.В., Анохина Т.О., Сизова О.И., Соколов О.И., Кочетков В.В., Боронин А.М., Patil S.G., Chaudhari A.B. Штаммы PGPR *Pseudomonas*, перспективные для создания биопрепаратов для защиты и стимуляции роста растений // *Биотехнология.* 2017. V. 33. № 2. P. 56–67. <https://doi.org/10.1016/0234-2758-2017-33-2-56-67>
20. Vives-Peris V., de Ollas C., Gómez-Cadenas A., Pérez-Clemente R.M. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond // *Plant Cell Rep.* 2020. V. 39 (1). P. 3–17. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02447-5>
21. Valente J., Gerin F., le Gouis J., Moënné-Loccoz Y., Prigent-Combaret C. Ancient wheat varieties have a higher ability to interact with plant growth-promoting rhizobacteria // *Plant Cell Environ.* 2020. V. 43. P. 246–260. <https://doi.org/10.1111/pce.13652>
22. Rieusset L., Rey M., Gerin F., Wisniewski-Dyé F., Prigent-Combaret C., Comte G. A Cross-metabolomic approach shows that wheat interferes with fluorescent

- Pseudomonas* physiology through Its root metabolites // Metabolites. 2021. V. 11. № 2. P. 84.
https://doi.org/10.3390/metabo11020084
23. Santoyo G., Moreno-Hagelsieb G., Orozco-Mosqueda M. del C., Glick B.R. Plant growth – promoting bacterial endophytes // Microbiol. Res. 2016. V. 183. P. 92–99.
https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008
 24. Andreote F.D., Pereira E., Silva M.C. Microbial communities associated with plants: learning from nature to apply it in agriculture // Curr. Opin. Microbiol. 2017. V. 37. P. 29–34.
https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.03.011
 25. Costa O., Raaijmakers J.M., Kuramae E.E. Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation // Front. Microbiol. 2018. V. 9. P. 1636.
https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636
 26. Saha I., Datta S., Biswas D. Exploring the role of bacterial extracellular polymeric substances for sustainable development in agriculture // Curr. Microbiol. 2020. V. 77. № 11. P. 3224–3239.
https://doi.org/10.1007/s00284-020-02169-y
 27. Backer R., Rokem J.S., Ilangumaran G. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture // Front Plant Sci. 2018. V. 9. P. 1473.
https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473
 28. Сидоров А.В., Зайцева Ю.В., Марков О.А. Влияние культуральной жидкости ассоциативных бактерий рода *Pseudomonas* на прорастание, морфогенез и рост *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó (Orchidaceae) в культуре *in vitro* // Вестн. ТомскГУ. Биология. 2020. Т. 51. С. 6–24.
https://doi.org/10.17223/19988591/51/1
 29. Singh U.B., Singh S., Malviya D., Karthikeyan N., Imran M., Chaurasia R., Alam M., Singh P., Sarma B.K., Rai J.P., Damodaran T., Tripathi J.K., Kumas S., Sharma A.K. Integration of anti-penetrant tricyclazole, signaling molecule salicylic acid and root associated *Pseudomonas fluorescens* enhances suppression of *Bipolaris sorokiniana* in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) // J. Plant Pathol. 2019. V. 101. P. 943–954.
https://doi.org/10.1007/s42161-019-00296-5
 30. Ma Z., Hua G.K.H., Ongena M., Höfte M. Role of phenazines and cyclic lipopeptides produced by *Pseudomonas* sp. CMR12a in systemic resistance on rice and bean // Environ. Microbiol. 2016. V. 8. № 5. P. 896–904.
https://doi.org/10.1111/1758-2229.12454
 31. Асатурова А.М., Жевнова Н.А., Цыгичко А.А., Аллахвердян В.В., Хомяк А.И., Бондарчук Е.Ю., Саенко К.Ю., Астахов М.М., Гырнец Е.А., Штерншис М.В. Использование лабораторных образцов биопрепаратов и их смесей с органоминеральными удобрениями для роста и развития растений озимой пшеницы и подсолнечника // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2019. Т. 20. № 6. P. 602–612.
https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.6.602-612
 32. Rieusset L., Rey M., Muller D., Vacheron J., Gerin F., Dubost A., Comte G., Prigent-Combaret C. Secondary metabolites from plant-associated *Pseudomonas* are overproduced in biofilm // Microb. Biotechnol. 2020. V. 13. № 5. P. 1562–1580.
https://doi.org/10.1111/1751-7915.13598
 33. Pandin C., Le Coq D., Canette A., Aymerich S., Briand R. Should the biofilm mode of life be taken into consideration for microbial biocontrol agents? // Microbiol. Biotechnol. 2017. V. 10. № 4. P. 719–734.
https://doi.org/10.1111/1751-7915.12693
 34. Zhai Y., Shao Z., Cai M., Zheng L., Li G., Huang D., Cheng W., Thomashow L.S., Weller D.M., Yu Z., Zhang J. Multiple modes of nematode control by volatiles of *Pseudomonas putida* 1A00316 from antarctic soil against *Meloidogyne incognita* // Front Microbiol. 2018. V. 9. P. 253.
https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00253
 35. Rosas S.B. *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* SRI: isolated from rhizosphere and its return as inoculant. A review // Inter. Biol. Rev. 2017. V. 1. № 3. P. 1–19.
 36. Yu K., Pieterse C.M.J., Bakker P.A.H.M., Berendsen R.L. Beneficial microbes going underground of root immunity // Plant Cell Environ. 2019. V. 42. № 10. P. 2860–2870.
https://doi.org/10.1111/pce.13632
 37. Petrova O., Sauer K. Escaping the biofilm in more than one way: desorption, detachment or dispersion // Curr. Opin. Microbiol. 2016. V. 30. P. 67–78.
https://doi.org/10.1016/j.mib.2016.01.004
 38. Heredia-Ponce Z., Gutiérrez-Barranquero J.A., Purtschert-Montenegro G., Eberl L., de Vicente A., Cazorla F.M. Role of extracellular matrix components in the formation of biofilms and their contribution to the biocontrol activity of *Pseudomonas chlororaphis* PCL 1606 // Environ. Microbiol. 2021. V. 23. № 4. P. 2086–2101.
https://doi.org/10.1111/1462-2920.15355
 39. Biessy A., Fillion M. Phenazines in plant-beneficial *Pseudomonas* spp.: biosynthesis, regulation, function and genomics // Environ. Microbiol. 2018. V. 20. P. 3905–3917.
https://doi.org/10.1111/1462-2920.14395
 40. Chosh P.K., Maiti T.K. Structure of extracellular polysaccharides (EPS) produced by rhizobia and their functions in legume-bacteria symbiosis: review // Archiv. Life Sci. 2016. V. 10. № 2. P. 136–143.
https://doi.org/10.1016/j.als.2016.11.003
 41. Bharmad K., Rajkumar S. Rewiring the functional complexity between Crc, Hfg and SRNS to regulate carbon catabolite repression in *Pseudomonas* // Word J. Microbiol. Biotechnol. 2019. V. 35. № 9. P. 140.
https://doi.org/10.1007/s11274-019-2717-7
 42. Liu Y., Gokhale C.S., Rainey P.B., Zhang X.-X. Unravelling the complexity and redundancy of carbon catabolic repression in *Pseudomonas fluorescens* SBW25 // Mol. Microbiol. 2017. V. 105. № 4. P. 589–605.
https://doi.org/10.1111/mmi.13720
 43. Verma A., Kumar S., Hemansi, Kumar G., Saini J.K., Agrawal R., Satlewal A., Ansari M.W. Chapter 17 – Rhizosphere metabolite proofing: an opportunity to understand plant – microbe interactions for crop improvement // Crop improvement through microbial biotechnology. New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering. 2018. P. 343–361.
https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63987-5.00017-7

44. Domröse A., Weihmann R., Thies S., Jaeger K.-L., Drepper T., Loeschcke A. Rapid generation of recombinant *Pseudomonas putida* secondary metabolite producers using Ytex // Synthetic System. Biotechnol. 2017. V. 2. № 4. P. 310–319.
<https://doi.org/10.1016/j.synbio.2017.11.001>
45. Yu J.M., Wang D., Pierson L.S., Pierson E.A. Disruption of MiaA provides insights into the regulation of phenazine biosynthesis under suboptimal growth conditions in *Pseudomonas chlororaphis* 30-84 // Microbiology. 2017. V. 163. P. 94–108.
<https://doi.org/10.1099/mic.0.000409>
46. Guttenberger N., Blankenfeld W., Breinbauer R. Recent developments in the isolation, biological function, biosynthesis, and synthesis of phenazine natural products // Bioorgan. Medic. Chem. 2017. V. 25. № 22. P. 6149–6166.
<https://doi.org/10.1016/j.bmc.2017.01.002>
47. Zhou L., Jiang H.-X., Sun S., Yang D.-D., Jin K.-M., Zhang W., He Y.-W. Biotechnological potential of a rhizosphere *Pseudomonas aeruginosa* strain producing phenazine-1-carboxylic acid and phenazine-1-carboximide // World J. Microbiol. Biotechnol. 2016. V. 32. P. 50.
<https://doi.org/10.1007/s11274-015-1987-y>
48. Jaaffar A.K., Parejko J.A., Paulitz T.C., Weller D.M., Thomashow L.S. Sensitivity of *Rhizoctonia* isolates to phenazine-1-carboxylic acid and biological control by phenazine-producing *Pseudomonas* sp. // Phytopathology. 2017. V. 107. P. 692–703.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-16-0257-R>
49. Morrison C.K., Arseneault T., Novinscak A., Fillon M. Phenazine-1-carboxylic acid production by *Pseudomonas fluorescens* LBUM636 alters *Phytophthora infestans* growth and late blight development // Phytopathology. 2017. V. 107. № 3. P. 273–279.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-16-0247-R>
50. Guo H., Roman D., Beemelmans C. Tropolone natural products // Nat. Prod. Rep. 2019. V. 36. № 8. P. 1137–1155. <https://doi.org/10.1039/C9NP00078F> // PloS ONE. 2016. V. 11. № 1. e0148003.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148003>
51. Wang D., Yu J.M., Dorosky R.J., Pierson L.S., Pierson E.A. The phenazine 2-hydroxy-phenazine-1-carboxylic acid promotes extracellular DNA release and has broad transcriptomic consequences in *Pseudomonas chlororaphis* 30-84 // PloS ONE. 2016. V. 11. № 1. e0148003.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148003>
52. Mahmoudi T.R. Bacterially mediated water stress tolerance in wheat conferred by phenazine-producing rhizobacteria // Master's thesis. 2017. <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/173201>
53. Geudens N., Martins J.C. Cyclic lipodepsipeptides from *Pseudomonas* spp. – biological swiss-army knives // Front Microbiol. 2018. V. 9. P. 1867.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01867>
54. Götze S., Stallforth P. Structure, properties, and biological functions of nonribosomal lipopeptides from *Pseudomonas* // Nat. Prod. Rep. 2020. V. 37. № 1. P. 29–54.
<https://doi.org/10.1039/C9NP00022D>
55. Blin K., Shaw S., Steinke K., Villebro R., Ziemert N., Lee S.Y., Medema M.H., Weber T. AntiSMASH 5.0: updates to the secondary metabolite genome mining pipeline // Nucleic Acids Res. 2019. V. 47. W. 81–W. <https://doi.org/10.1093/nar/gkz310>
56. Pupin M., Flissi A., Jacques P., Leclère V. Bioinformatics tools for the discovery of new lipopeptides with biocontrol applications // Eur. J. Plant Pathol. 2018. P. 152. № 4. P. 993–1001.
<https://doi.org/10.1007/s10658-018-1544-2>
57. Flury P., Vesga P., Péchy-Tarr M., Aellen N., Dennert F., Hofer N., Kupferschmid K.P., Kupferschmid P., Metla Z., Siegfried S., de Weert S., Bloemberg G., Höfte M., Keel C.J., Maurhofer M. Antimicrobial and insecticidal cyclic lipopeptides and hydrogen cyanide produced by plant-beneficial *Pseudomonas* strains CHA0, and PCL1391 contribute to insect killing // Front. microbiol. 2017. V. 8. P. 100.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00100>
58. de Oliveira Schmidt V.K., de Souza Carvalho J., de Oliveira D., de Andrade C.J. Biosurfactant inducers for enhanced production of surfactin and rhamnolipids: an overview // World J. Microbiol. Biotechnol. 2021. V. 37. P. 21.
<https://doi.org/10.1007/s11274-020-02970-8>
59. Bruce J.B., West S.A., Griffin A.S. Bacteriocins and the assembly of natural *Pseudomonas fluorescens* populations // J. Evolut. Biol. 2017. V. 30. № 2. P. 352–360.
<https://doi.org/10.1111/jeb.13010>
60. Jiang Z., Chen M., Yu X., Xie Z. 7-Hydroxytropolone produced and utilized as an iron-scavenger by *Pseudomonas donghuensis* // Biometals. 2016. V. 29. № 5. P. 817–826.
<https://doi.org/10.1007/s10534-016-9954-0>
61. Huang R., Feng Z., Chi X., Sun X., Lu Y., Zhang B., Lu R., Luo W., Wang Y., Miao J., Ge Y. Pyrrolnitrin is more essential than phenazines for *Pseudomonas chlororaphis* G05 in its suppression of *Fusarium graminearum* // Microbiol. Res. 2018. V. 215. P. 55–64.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.06.008>
62. Verma B., Kumar P., Karthik L., Dhanasekaran D., Babalola O.O., Banakar S.P. Gas-chromatography – mass spectrometry analysis and antibacterial activity of bluish-green pigment from *Pseudomonas* sp. JJTBVK(KF836502) // Brazil. Arch. Biol. Technol. 2015. V. 58 (4). P. 628–635.
<https://doi.org/10.1590/S1516-8913201500108>
63. Deveau A., Gross H., Palin B., Mehnaz S., Schnepf M., Leblond P., Dorrestein P.C., Aigle B. Role of secondary metabolites in the interaction between *Pseudomonas fluorescens* and soil microorganisms under iron limited conditions // FEMS Microbiol. Ecol. Adv. Acces. 2016. V. 92. № 8. P. 107.
<https://doi.org/10.1093/femsec/fim107>
64. Sharma D., Gupta M., Gupta S., Jaglans S., Mallick S.A. Characterization of secondary metabolites produced during interaction of *Pseudomonas fluorescens* with *Fusarium oxysporum* // Ind. J. Agricult. Sci. 2019. V. 89. № 6. P. 998–1004.
65. Aziz M., Nadipalli R.K., Xie X., Sun Y., Surowiec K., Zhang J.-L., Paré P.W. Augmenting sulfur metabolism and herbivore defense in *Arabidopsis* by bacterial volatile signaling // Front. Plant. Sci. 2016. V. 7. P. 458.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00458>

66. Zhai Y., Shao Z., Cai M., Zheng L., Li G., Huang D., Cheng W., Thomashow L.S., Weller D.M., Yu Z., Zhang J. Multiple modes of nematode control by volatiles of *Pseudomonas putida* 1A00316 from antarctic soil against *Meloidogyne incognita* // Front. Microbiol. 2018. V. 9. P. 253.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00253>
67. Flury P., Vesga P., Pechy-Tarr M., Aellen N., Dennert F., Hofer N., Kupferschmied K.P., Kupferschmied P., Metla Z., Ma Z., Siegfried S., de Weert S., Bloemberg G., Höfte M., Keel C.J., Maurhofer M. Antimicrobial and insecticidal: Cyclic lipopeptides and hydrogen cyanide produced by plant-beneficial *Pseudomonas* strains CHA0, CMR12a, and PCL1391 contribute to insect killing // Front. Microbiol. 2017. V. 8. P. 100.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.001001>
68. Kang B.R., Anderson A.J., Kim Y.C. Hydrogen cyanide produced by *Pseudomonas chlororaphis* O6 exhibits nematocidal activity against *Meloidogyne hapla* // Plant Pathol. J. 2018. V. 34. P. 35–43.
<https://doi.org/PPJ.OA.06.2017.0115>
69. Kang B.R., Anderson A.J., Kim Y.C. Hydrogen cyanide produced by *Pseudomonas chlororaphis* O6 is a key aphicidal metabolite // Can. J. Microbiol. 2019. V. 65. P. 185–190.
<https://doi.org/10.1139/cjm-2018-0372>
70. Nam H.S., Anderson A.J., Kim Y.C. Biocontrol efficacy of formulated *Pseudomonas chlororaphis* O6 against plant diseases and root-knot nematodes // Plant Pathol. J. 2018. V. 34. P. 241–249.
<https://doi.org/10.5423/PPJ.NT.12.2017.0264>
71. Hernández-Calderón E., Aviles-Garcia M.E., Castulo-Rubio D.Y., Macías-Rodríguez L., Ramírez V.M., Santoyo G., López-Bucio J., Valencia-Cantero E. Volatile compounds from beneficial or pathogenic bacteria differentially regulate root exudation, transcription of iron transporters, and defense signaling pathways in *Sorghum bicolor* // Plant Mol. Biol. 2018. V. 96. № 3. P. 291–304.
<https://doi.org/10.1007/s11103-017-0694-5>
72. Santoyo G., Urtis-Flores C.A., Loeza-Lara P.D., Orozco-Mosqueda M.de C., Glick B.K. Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacterium (PGPR) // Biology. 2021. V. 10. P. 475.
<https://doi.org/10.3390/biology10060475>
73. Hheng X., Cordovez V., Etalo D.W., van der Voort M., Raaijmakers J.M. Role of the GacS sensor kinase in the regulation of volatile production by plant growth-promoting *Pseudomonas fluorescens* SBW25 // Front. Plant. Sci. 2016. V. 7. P. 1706.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01706>
74. Saha M., Sarkar S., Sarkar B., Sharma B.K., Bhat-tacharjee S., Tribedi P. Microbial siderophores and their potential applications: a review // Environ. Sci. Pollut. Res. 2016. V. 23. P. 3984–3999.
<https://doi.org/10.1007/s11356-015-4294-0>
75. Jadhav H.P., Shaikh S.S., Sayyed R.Z. Role of hydrolytic enzymes of rhizoflora in biocontrol of fungal phytopathogens: an overview // Rhizotrophs: plant growth promotion to bioremediation. Microorganisms for sustainability. 2017. V. 2. P. 183–203.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-4862-3_9
76. Коришнуова Т.Ю., Бакаева М.Д., Кузина Е.В., Рафи-кова Г.Ф., Четвериков С.П., Четверикова Д.В., Ло-гинов О.Н. Роль бактерий рода *Pseudomonas* в устойчивом развитии агроэкосистем и защите окружающей среды (обзор) // Прикл. биохим. и микробиол. 2021. Т. 57 (3). С. 211–227.
<https://doi.org/10.318571/S0555109221030089>

Role of *Pseudomonas* Bacteria and Their Metabolites in the Biocontrol of Phytopathogenic Microorganisms

T. M. Sidorova^{a, #}, V. V. Allahverdyan^a, and A. M. Asaturova^a

^aFederal Research Center of Biological Plant Protection
s/b 39, Krasnodar 350039, Russia

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

The current knowledge on the prospects of using bacteria of the genus *Pseudomonas* as producers of effective microbiological preparations for the biocontrol of phytopathogenic organisms is summarized and analyzed. Rhizospheric pseudomonads are potential objects of agricultural biotechnology due to the presence of physiological and biochemical features necessary for biocontrol and phytostimulation. These features include tolerance to reactive oxygen species, chemotaxis in relation to root exudates, biosynthesis of siderophores and antibiotic metabolites of various nature. Members of the genus *Pseudomonas* are known for their great metabolic diversity, which allows them to colonize a wide range of ecological niches, including the rhizosphere. *Pseudomonas* species isolated from the rhizosphere have a broader catabolic activity than those isolated from the bulk soil, especially for certain sugars, polyols, and amino acids that can be found in root exudates. The wide metabolic diversity allows bacteria to become ubiquitous, forming protective biofilms and colonizing various ecological niches. At the same time, water-retaining capacity, fertility and porosity of the soil, as well as the conditions of mineral nutrition of plants are improved by increasing the availability of N, P, K and Fe. The paper describes in detail the main biologically active metabolites produced by *Pseudomonas* and their role in the suppression of phytopathogens and phytostimulation.

Key words: ecological niche, rhizosphere, rhizobacteria, bacteria of the genus *Pseudomonas*, biologically active compounds, biocontrol.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

DOI: 10.31857/S000218812305006X, EDN: URWQNT

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

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

3. Статьи должны сопровождаться направлением на опубликование от того учреждения, в котором выполняли работу, и экспертным заключением, в котором говорится об отсутствии сведений, запрещенных к опубликованию. К статье необходимо приложить договор о передаче авторского права РАН (текст договора на имя главного редактора журнала размещен на сайте РАН www.gas.ru), а также справку, подтверждающую оригинальность представленных материалов (не менее 80% от объема статьи). Справку можно получить в Интернете, в бесплатной программе “Антиплагиат”. **Статьи и сопроводительные документы должны быть представлены только в электронном виде и присланы в редакцию по электронной почте. Адрес электронной почты редакции: j.agrochem@mail.ru.** Текст, таблицы и рисунки следует размещать в одном файле.

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

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

6. Начало статьи оформляется по образцу: название, инициалы и фамилии авторов, полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнена работа, почтовый адрес каждого

учреждения с индексом, страна, адрес электронной почты. Далее приводится расширенная аннотация (до 1 страницы), а также ключевые слова. Аннотация должна включать цель работы, методу кратко и основные результаты. Кроме того, все эти данные необходимо представить на английском языке в конце рукописи на отдельной странице.

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

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

Заглавие статьи должно быть информативным, включать ключевые слова.

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

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

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

При описании полевых опытов дозы удобрений, выраженные в кг/га N, P₂O₅ и K₂O, пишутся на строке (N90P60K60); для вегетационных опытов дозы питательных веществ (N, P, K), выра-

женные в мг/кг, пишутся в нижнем индексе ($N_{100}P_{75}K_{100}$).

При описании опытов с культурами растений должны быть указаны их сорта. При упоминании видов растений необходимо приводить их латинское название и авторов классификации; названия микроорганизмов и грибов следует писать только на латыни. Родовые и видовые латинские названия растений, грибов и микроорганизмов надо печатать курсивом. Например, *Triticum aestivum* L., *Sinorhizobium meliloti*.

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

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

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

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

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

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

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

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

В таблицах употребляются символы химических элементов.

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

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

N_{aa} — аммоний азотнокислый (селитра аммиачная);

N_a — аммоний сернокислый;

N_m — мочеви́на (карбамид);

N_c — селитра натриевая;

N_{ck} — селитра калийная;

$N_{ckц}$ — селитра кальциевая;

$N_{ц}$ — цианамид кальция;

$N_{ва}$ — водный аммиак;

$N_{ба}$ — безводный аммиак;

P_c — суперфосфат простой;

$P_{сг}$ — суперфосфат простой гранулированный;

$P_{сд}$ — суперфосфат двойной;

$P_{п}$ — преципитат;

$P_{оф}$ — обесфторенный фосфат;

$P_{ф}$ — фосфоритная мука;

$P_{фш}$ — фосфатшлак;

K_x — калий хлористый;

K_c — калий сернокислый;

$K_{мг}$ — калимагnezия;

АФ — аммофос;

ДАФ — диаммофос;

ДАФК — диаммофоска;

АЗФК — азофоска;

КАФ — карбоаммофос;

КАФК — карбоаммофоска;

МФК — метафосфат калия;

НАФ — нитроаммофос;

НФ — нитрофос;

НФК — нитрофоска;

НАФК — нитроаммофоска;

ПФА — полифосфат аммония;

ФМ — фосфат мочевины;

ЖКУ — жидкое комплексное удобрение;

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

Другие сокращения необходимо расшифровать.

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

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

Примеры оформления библиографического описания

Для монографий:

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

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

Для сборников:

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

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

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

Для трудов:

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

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

Для журналов:

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

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

Для авторефератов и диссертаций:

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

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

Для патентных документов:

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

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

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

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

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

18. Плата за публикацию рукописей не взимается.