

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 арома-

тических 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 фосфатсольбилизирующих бактерий также является устойчивым подходом к увеличению доступного содержания фосфора в почвах для производства сельскохозяйственных культур [52]. Иммунизация 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.

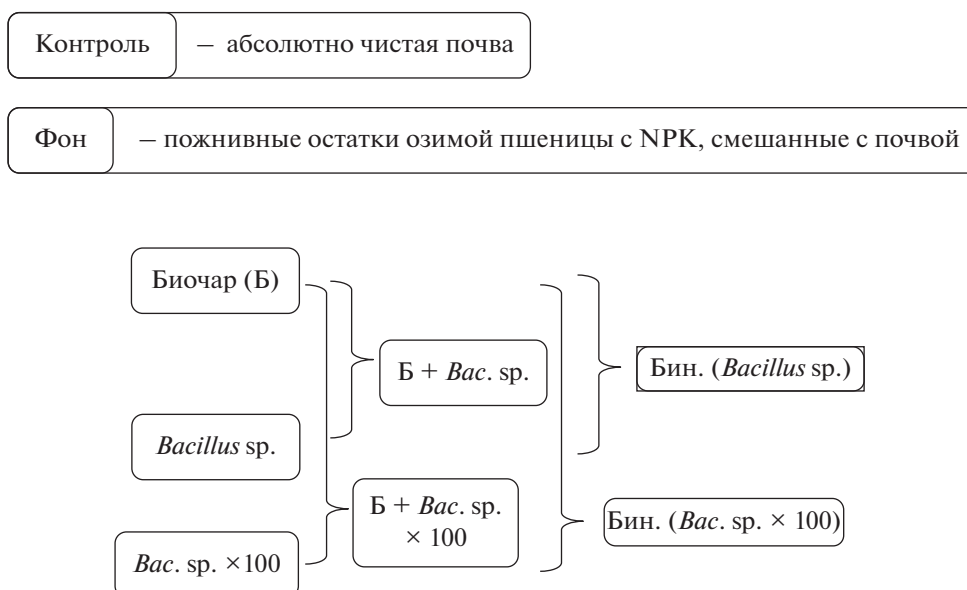


Рис. 1. Схема эксперимента.

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°С. 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. \times 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.

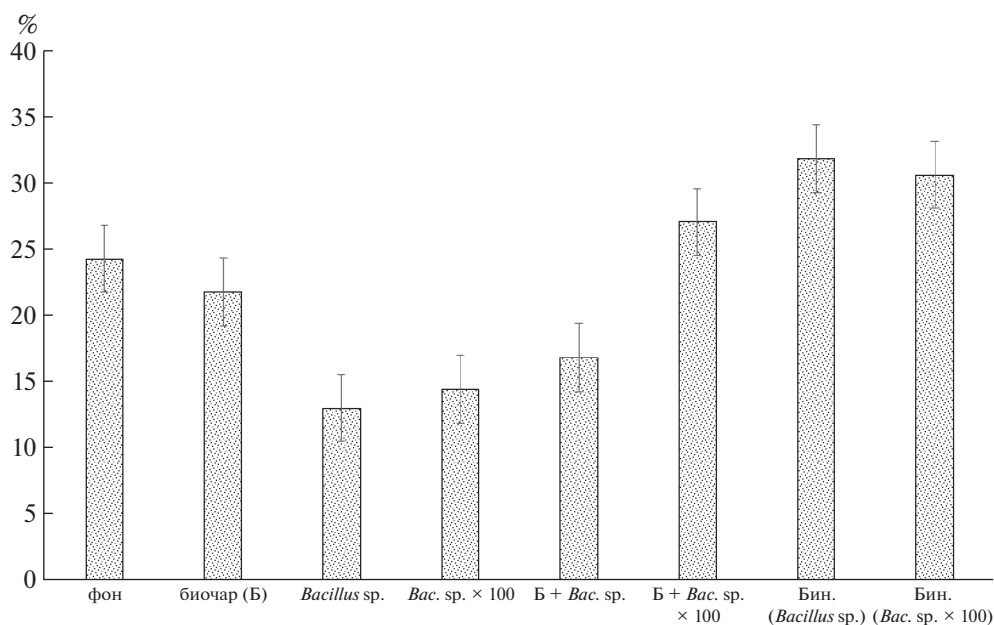


Рис. 2. Изменение эмиссии CO₂ чернозема обыкновенного при добавлении биочара и *Bacillus* sp.

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 равном 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-

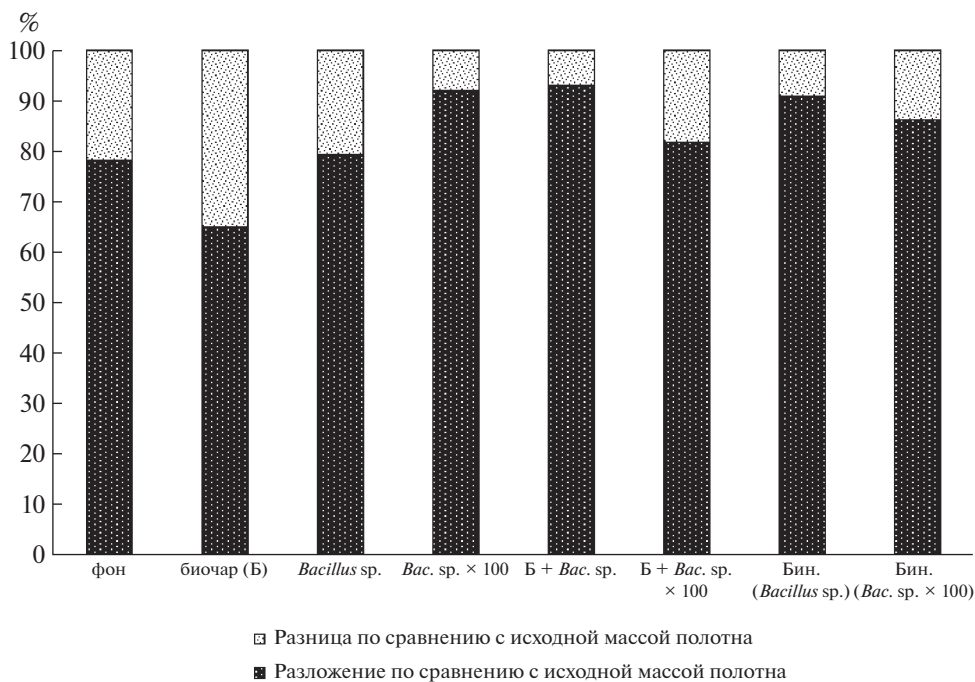


Рис. 3. Изменение целлюлозолитической активности чернозема обыкновенного при добавлении биочара и *Bacillus sp.*

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 целлюлозолитической активности на 35% по сравнению с исходной массой полотна.

При добавлении *Bacillus sp.* и *Bacillus sp. × 100* целлюлозолитическая 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, целлюлозолитическая 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* целлюлозолитическая 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

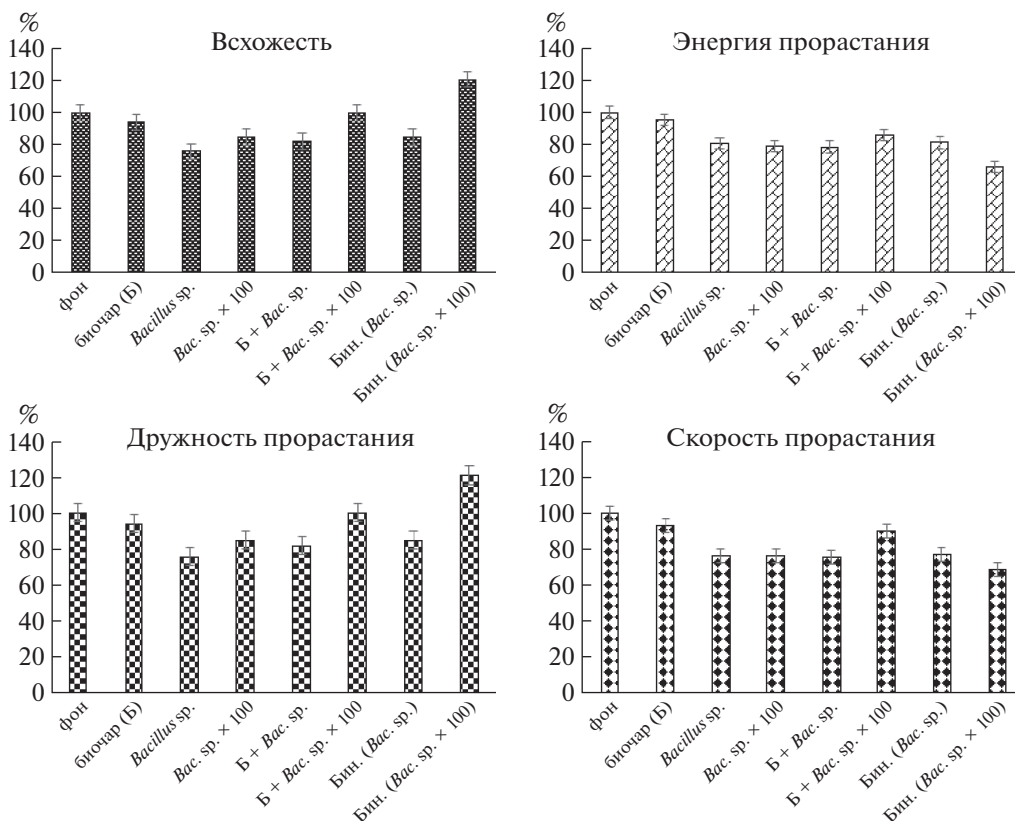


Рис. 4. Изменение интенсивности начального роста семян ячменя (*Hordeum Vulgare* L.) на черноземе обыкновенном при добавлении биочара и *Bacillus sp.*

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 CO_2 и разложению целлюлозного полотна. Наибольший вклад каждого вещества в процесс разложения полотна и восстановление экологического состояния почвы установлен после внесения *Bacillus sp.* × 100 и биочар + *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].

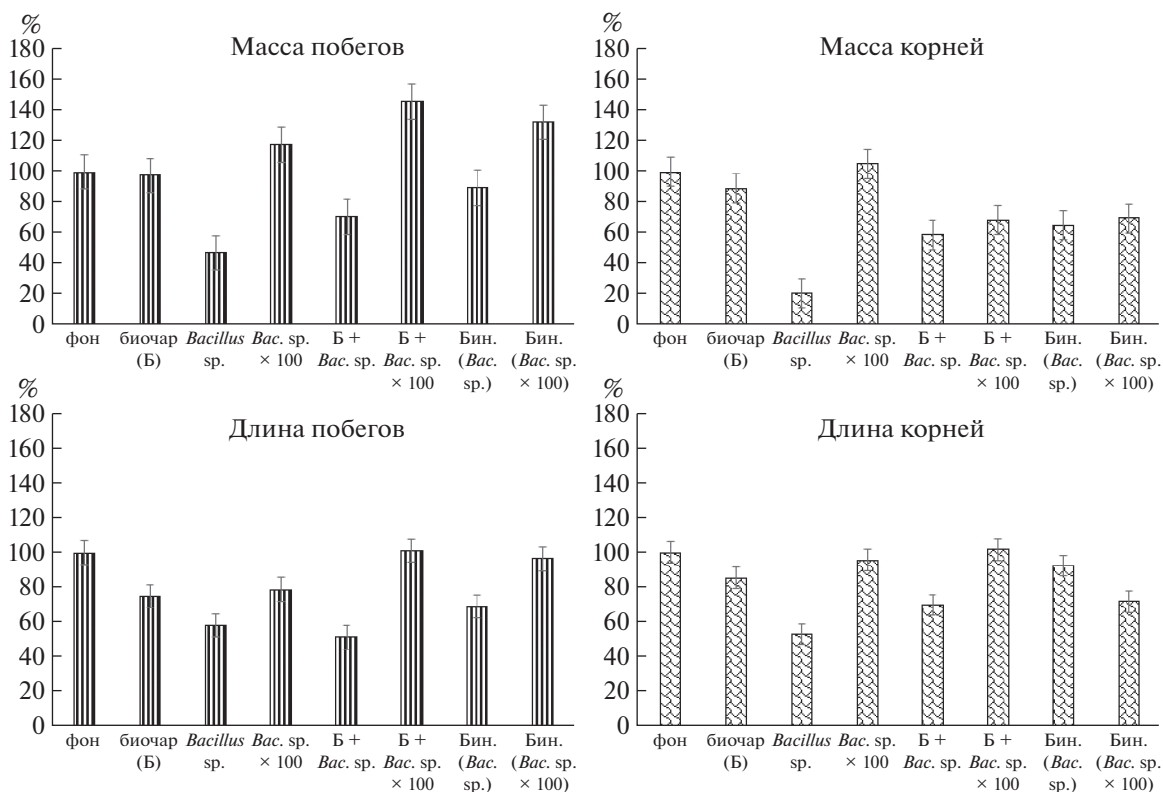


Рис. 5. Изменение показателей роста ячменя (*Hordeum vulgare* L.) на черноземе обыкновенном при добавлении биочара и *Bacillus* sp., % к контролю.

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., Simitić 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/AGRPH.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/AGRPH.2019.02.04>

7. *Сабитов М.М.* Влияние многолетних трав на повышение плодородия почв и продуктивности зерновых культур // *Агротех. 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., Zebbarh 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. *Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н.* Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // *Агротехимия.* 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 // *Агротехимия.* 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 суллинистом 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 Zwielen 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., Ahamed T.S., Kumar S.S., Shanmugam S., Samuel M.S., Brindha Devi 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 органогенном 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. *Кудеяров 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., Юра-нец-Лужаева Р.С.* 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. *Кудеяров 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. *Кудеяров 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., Кудеяров 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

^a*Southern 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.