

МРНТИ 62.01.94

<https://doi.org/10.26577/bb1072202615>

А.А. Нуржанова<sup>1</sup> , А.Ю. Муратова<sup>2</sup> , А.С. Нурмагамбетова<sup>1</sup> ,  
Ж.Е. Жумашева<sup>1</sup> , А. Мамирова<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup> Институт биологии и биотехнологии растений, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов

ФИЦ Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия

<sup>3</sup> Кафедра биотехнологии, Факультет биологии и биотехнологии,  
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*e-mail: Aigerim.mamirova@mail.com

## БИОЧАР – ИНСТРУМЕНТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ

В данном обзоре были рассмотрены вопросы применения биочара в качестве удобрения и носителя интродуцируемых микроорганизмов для решения задач экологической биотехнологии. Более того в обзоре описаны методы получения биочара с заданными физико-химическими свойствами, механизмы его взаимодействия с органическими (пестицидами) и неорганическими (тяжёлыми металлами) загрязнителями, а также потенциальные риски, связанные с его использованием. Особое внимание было уделено механизмам иммобилизации микробных клеток на поверхности биочара, их взаимодействию с углеродной матрицей и возможностям применения таких композиций для очистки почв от загрязнителей. В обзоре обобщены и углублены знания об использовании микроорганизмов, иммобилизованных на биочаре, для восстановления структурных характеристик почвы и повышения её плодородия.

Повышение эффективности фиторемедиация является стратегически важным этапом исследований. С целью ускорения наращивания биомассы растений, повышения эффективности технологии очистки и адаптивности растений, биочар рассматривается в качестве внедряемого инструмента для усиления технологий био- и фиторемедиации. Биочар получали путём термического разложения растительных или животных остатков в анаэробных условиях или при пониженном содержании кислорода. Положительное влияние на свойства почвы и рост растений объяснялось наличием в его составе минералов (K, Ca, P, Na, Mg и др.), способствующих нейтрализации кислотности, снижению абиотического стресса и стимуляции роста растений. Кроме того, биочар адсорбировал токсичные элементы, что приводило к снижению их мобильности, биодоступности и фито- и экотоксичности. Практическое применение биочара было представлено как инновационный подход к минимизации загрязнения почв.

Целью статьи является расширение представлений о современных методах иммобилизации микроорганизмов на биочаре для улучшения почвенных свойств, повышения плодородия и эффективной стабилизации органических и неорганических загрязнителей в окружающей среде.

**Ключевые слова:** биочар, пиролиз, почва, тяжелые металлы, стойкие органические загрязнители.

A.A. Nurzhanova<sup>1</sup>, A.Yu. Muratova<sup>2</sup>, A.S. Nurmagambetova<sup>1</sup>,  
Zh.E. Zhumasheva<sup>1</sup> and A. Mamirova<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Plant Biology and Biotechnology, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms  
FRC Saratov Scientific Centre RAS, Saratov, Russia

<sup>3</sup>Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology,  
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: Aigerim.mamirova@mail.com

### Biochar as a tool of environmental biotechnology

Current review examines the application of biochar as both a soil amendment and a carrier for microbial cells aimed at addressing challenges in environmental biotechnology. Furthermore, the review describes methods for producing biochar with tailored physicochemical properties, mechanisms of its interaction with organic (pesticides) and inorganic (heavy metals) contaminants, and the potential environmental risks associated with its application. Particular attention is given to the mechanisms of microbial cell immobilization on the biochar surface, their interactions with the carbon matrix, and the potential

of such biochar–microbe complexes for soil remediation. The review consolidates and advances current knowledge on the use of biochar-immobilized microorganisms for restoring soil structural characteristics and enhancing its fertility.

Improving the efficiency of phytoremediation is a strategically important research objective. To improve plant biomass yield, increase the effectiveness of remediation technologies, and accelerate plant adaptability, biochar is considered a promising tool for enhancing both bio- and phytoremediation processes. Biochar is produced through the thermal decomposition of plant or animal residues under anaerobic or low-oxygen conditions. Its positive impact on soil properties and plant growth is attributed to the presence of minerals (K, Ca, P, Na, Mg, etc.), which help neutralize soil acidity, reduce abiotic stress, and stimulate plant development. Furthermore, biochar exhibits strong sorption capacity for toxic elements, thereby reducing their mobility, bioavailability, and phyto- and ecotoxicity. In practical applications, biochar is presented as an innovative approach for mitigating soil contamination.

The aim of the current study is to broaden the understanding of up-to-date methods for microbial immobilization on biochar to improve soil properties, enhance fertility, and effectively stabilize both organic and inorganic contaminants in the environmental matrices.

**Keywords:** biochar, pyrolysis, soil, potentially toxic elements, persistent organic pollutants.

А.А. Нуржанова<sup>1</sup>, А.Ю. Муратова<sup>2</sup>, А.С. Нурмагамбетова<sup>1</sup>,  
Ж.Е. Жумашева<sup>1</sup>, А. Мамирова<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Өсімдіктер және микроорганизмдер биохимиясы және физиологиясы институты РҒА ФҒО Саратов ғылыми орталығы, Саратов, Ресей

<sup>3</sup>Биотехнология кафедрасы, биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: Aigerim.mamirova@mail.com

### Биочар – қоршаған орта биотехнология құралы

Бұл шолуда биочарды қоршаған орта биотехнологиясының мәселелерін шешу үшін тыңайтқыш және енгізілген микроорганизмдердің тасымалдаушысы ретінде пайдалану мәселелері қарастырылды. Сонымен қатар шолуда физикалық және химиялық қасиеттері көрсетілген биочарды алу әдістері, оның органикалық (пестицидтер) және бейорганикалық (ауыр металдар) ластаушы заттармен әрекеттесу механизмдері, сондай-ақ оны пайдаланумен байланысты ықтимал қауіптер сипатталған. Биочардың бетіндегі микроб жасушаларының иммобилизациялану механизмдеріне, олардың көміртекті матрицамен әрекеттесуіне және мұндай композицияларды топырақты ластаушы заттардан тазарту үшін пайдалану мүмкіндіктеріне ерекше назар аударылды. Шолу топырақтың құрылымдық ерекшеліктерін қалпына келтіру және оның құнарлылығын арттыру үшін биочарға иммобилизацияланған микроорганизмдерді қолдану туралы білімді жинақтайды және тереңдетеді.

Фиторемедиацияның тиімділігін арттыру зерттеудің стратегиялық маңызды кезеңі болып табылады. Өсімдік биомассасының өсуін жеделдету, тазарту технологиясының тиімділігін және өсімдіктердің бейімделуін арттыру мақсатында биочар био- және фиторемедиация технологияларын жетілдірудің іске асырылған құралы ретінде қарастырылады. Биочар өсімдік немесе жануар қалдықтарын анаэробты жағдайда немесе оттегінің төмендетілген деңгейінде термодырату арқылы алынды. Биочар топырақ қасиеттеріне және өсімдіктердің өсуіне оң әсері оның құрамында қышқылдықты бейтараптандыруға, абиотикалық стрессті төмендетуге және өсімдіктердің өсуін ынталандыруға көмектесетін минералдардың (K, Ca, P, Na, Mg және т.б.) болуымен түсіндірілді. Сонымен қатар биочар улы элементтерді өзіне сіңірді, бұл олардың қозғалғыштығының, биожетімділігінің, фито- және экоуыттылығының төмендеуіне әкелді. Биочарды тәжірибелік қолдану топырақтың ластануын азайтудың инновациялық тәсілі ретінде ұсынылды.

Мақаланың мақсаты – топырақтың қасиеттерін жақсарту, құнарлылығын арттыру және қоршаған ортадағы органикалық және бейорганикалық ластаушы заттарды тиімді тұрақтандыру үшін биочарды микроорганизмдерді иммобилизациялаудың заманауи әдістері туралы түсінікті кеңейту.

**Түйін сөздер:** биочар, пиролиз, топырақ, ауыр металдар, тұрақты органикалық ластаушылар.

## Введение

В настоящее время по результатам ежегодного экологического мониторинга в Республике Казахстан и зарубежных исследований регулярно выявляются экологические матрицы, загрязнённые веществами различного происхождения (Brunet, 2001; Mamirova et al., 2019; Tarla et al., 2020). Загрязнение расположенных вблизи промышленных объектов сельскохозяйственных почв токсичными тяжелыми металлами и металлоидами, такими как As, Cd и Pb, а также менее токсичными Cu и Zn, вызывает серьезную озабоченность с точки зрения безопасности пищевых культур, а также окружающей среды и здоровья населения (Lwin et al., 2023; Ma et al., 2024; Sharma et al., 2022;). Тяжелые металлы (ТМ) накапливаются в верхнем слое почвы 0–10 см, вымывая подвижные формы в нижние горизонты до 80 см (Chen et al., 2021; Pichtel, 2016;). Литературные данные за последние 25 лет свидетельствуют о наличии в Казахстане загрязненных тяжелыми металлами участков вблизи промышленных объектов (Baubekova et al., 2021; Safirova, 2019). Присутствие очагов загрязнения требует разработки и внедрения технологий для восстановления нарушенных экологических матриц. Общие методы физико-химической реабилитации загрязненных ксенобиотиками земель требуют больших инвестиций (Gunasundari & Senthil Kumar, 2017). Считается, что традиционные методы восстановления часто оказываются неадекватными в решении сложной проблемы детоксикации поллютантов, тем самым подчеркивая потребность в инновационных подходах к борьбе с загрязнителями, их эффективное устранение (Gamalero & Glick, 2024). В настоящее время фиторемедиация является многообещающей технологией, которая гармонично взаимодействует с экосистемой. Преимуществом данной технологии является отсутствие необходимости дорогостоящего оборудования и возможность извлечения широкого спектра загрязнителей из матриц окружающей среды (Lekshmi et al., 2024; Yan et al., 2020). Технология фиторемедиации имеет некоторые лимитирующие параметры, такие как длина корней растений, долгий период восстановления, климатические различия и использование не эндемичных видов, которые могут привести к нарушению биоразнообразия, медленный рост растений, ограничивающий быстрый эффект, и низкий урожай биомассы (Nsanganwimana et al., 2014; Wan et al.,

2016). Для улучшения вышеуказанных аспектов, технология фиторемедиации была усилена использованием органических и неорганических почвенных добавок (органические кислоты, поверхностно-активные вещества, наночастицы, рамнолипиды, биочар), а также использованием ассоциации растений с микроорганизмами (Kidd et al., 2017; Llovet et al., 2021; Mamirova et al., 2021; Nebeská et al., 2021; Pidlisnyuk et al., 2021; Radziemska et al., 2022). Считают, что использование этих приемов является стратегически важным этапом повышения эффективности фиторемедиации (Lin et al., 2021). Фиторемедиация, основанная на синергетическом действии растений и связанных с ними микроорганизмов, является на сегодня перспективным *in situ* подходом к восстановлению почвы, загрязненной тяжелыми металлами по сравнению с традиционными методами очистки (Baker et al., 2000; Deepika & Haritash, 2024; Pilon-Smits, 2005; Tarla et al., 2020; Tsao, 2003). Например, Khan et al. (2017) выявили важность *Catharanthus roseus* и их ассоциации с ризобактериями в фиторемедиации почвы, загрязненной Cu и Pb. Авторы проиллюстрировали, что *C. roseus*, инокулированный бактериальными штаммами *Pseudomonas fluorescens* RB4 и *Bacillus subtilis* 189, продемонстрировал более высокие показатели биомассы из-за смягчения химического стресса. Наряду с бактериями арбускулярные микоризные грибы также обладают способностью стимулировать рост растений и эффективность фитотехнологии (Bhantana et al., 2021). Однако недостатками этого подхода являются низкая колонизация микроорганизмами корней при высоких уровнях стресса от тяжелых металлов и плохое состояние роста растений (Wu et al., 2024). Биоремедиация с использованием микроорганизмов имеет некоторые ограничения: токсичность высоких концентраций загрязнителей для микроорганизмов; дефицит питательных веществ в загрязненной среде; конкуренция микробов-интродуцентов с местной микробиотой, их выживание и пролиферация (Oro et al., 2024). Для преодоления этих недостатков, микроорганизмы иммобилизуют на различных твердых матрицах, в частности биочаре, наночастицах и других для обеспечения стабильности и повышения эффективности восстановления (Liang et al., 2023; Schommer et al., 2024; Upadhyayula et al., 2009; Wu et al., 2019). В обзоре Ouyang et al. (2023) отмечено, что по сравнению с традиционными физическими и химическими методами очистки внесение биочара

является перспективным подходом к снижению загрязнения почвы путем иммобилизации тяжелых металлов и органических загрязнителей.

Научное сообщество стало уделять пристальное внимание широкому использованию биочара в области экологической биотехнологии, так как он эффективен при очистке окружающей среды, загрязненной тяжелыми металлами, может стабилизировать тяжелые металлы в почвах, уменьшая их подвижность и биодоступность (Forján et al., 2018; Gong et al., 2019; Narayanan & Ma, 2022). Анализ литературы свидетельствует о масштабных исследованиях по применению биоугольных материалов (биочаров) для улучшения различных почвенных экосистем (Huang et al., 2023). Практическое использование биочара рассматривают, как инновационный подход для минимизации загрязнения почвы (Ahmad et al., 2014; Kabir et al., 2023). В обзоре Nguyen et al. (2023) есть указания на то, что биочар может удалять до 80% тяжелых металлов из загрязненных почв. Интерес к биочару из года в год растет. По последним расчетам, сделанным в начале 2023 года аналитическим центром Precedence Research, рынок биочара в 2022 году составлял 220 млн долл. Ожидается, что в рамках следующих 10 лет – к 2032 году, его доля будет более 633 млн долл. Стоимость биочара варьирует от ста до пяти тысяч долларов США за тонну (Maroušek et al., 2019). По данным авторитетной американской фирмы по исследованию рынка и консалтингу мировой рынок биочара оценивается в 541,8 млн долларов США в 2023 году и, как ожидается, будет расти с годовым темпом прироста 13,9% с 2024 по 2030 год (Grand View Research, 2024).

Таким образом, целью настоящей обзорной статьи являлись обобщение и обсуждение современных научных представлений, а также выявление пробелов в знаниях о взаимодействии биочара с окружающей средой, загрязняющими веществами и микроорганизмами. Для достижения поставленной цели был проведен поиск научной литературы в трёх основных базах данных: Web of Science, Scopus и Google Scholar. Поиск осуществлялся с использованием следующих комбинаций ключевых слов: «biochar» AND «soil»; «biochar» AND «contamination»; «biochar» AND «POPs»; «biochar» AND «heavy metals»; «biochar» AND «microorganisms». Результаты поиска были отфильтрованы таким образом, чтобы охватить научные статьи, опубликованные в период с 2015 по 2025 год.

### *1. Методы получения биочара*

Биочар производится путем разложения остатков животных или растений в условиях анаэробных или при низком содержании кислорода (Grand View Research, 2024; K. Huang et al., 2023; Janus et al., 2020; Khan et al., 2017; Kononchuk et al., 2022; Novak et al., 2018; Tomczyk et al., 2020; Wagner & Kaupenjohann, 2015). Использование разного исходного сырья также приводит к вариативности площади поверхности, пористости и функциональных групп на поверхности биочара, что влияет на его свойства. Рисовая шелуха, древесная кора, хвосты сахарной свеклы, кожура фруктов, сосновая древесина, древесные отходы и растительные остатки являются наиболее распространенным сырьем для производства биочара в сельскохозяйственном секторе (Khawkomol et al., 2021). Эффективность биочара в различных областях применения зависит от исходного сырья, его состава, а также температуры пиролиза и методов, используемых для его производства (Boorboori & Lackóová, 2023; Brtnicky et al., 2021; Fang et al., 2015). Продемонстрировано, что биочар на основе древесины содержит больше углерода и меньше доступных растениям питательных веществ, в то время как биочар на основе навоза имеет обратную тенденцию. Биочар на основе травы по своим характеристикам обычно находится между древесным и навозным биочарами (Ippolito et al., 2020; Reyhanitabar et al., 2020). В зависимости от производства биочара различают пиролитический и гидротермальный. Биочар, полученный путем гидротермальной карбонизации, называется гидрочар. Гидрочар, полученный из отходов, включая макулатуру, пищевые отходы, смешанные твердые бытовые отходы и отходы анаэробного сбраживания, имеет выход от 29 до 63% при температуре от 225 до 265°C (Fang et al., 2015). Гидрочар обычно кислый, обладает особыми физико-химическими свойствами, что делает его очень подходящим для использования в производстве биоэнергии, улучшении почвы, связывании углерода и очистке сточных вод от загрязнения (Azzaz et al., 2020; Fang et al., 2015; Khanzada et al., 2024). Благодаря своим многочисленным поверхностным функциональным группам гидрочар обладает значительной адсорбционной способностью как для полярных, так и для неполярных органических загрязнителей (Hesham et al., 2021; Mahmood Al-Nuaimy et al., 2024).

Биочар получают из биомассы путем пиролиза в три этапа: пред-пиролиз при температуре

до 200°C, во время которого выделяются влага и летучие вещества. Испарение воды приводит к разрыву связей и образованию групп перекиси водорода, -COOH и -CO; основным этап пиролиза – при 200 до 500°C происходит ароматизация и внутримолекулярная конденсация гемицеллюлозы и целлюлозы, что приводит к образованию твердого биочара; заключительный этап – при температуре выше 500°C – включает деградацию лигнина и других органических веществ с прочными химическими связями (Pahnila et al., 2023; Zhang et al., 2017). Содержание целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина в исходном сырье, а также температура пиролиза, используемая для получения биочара, влияют на его свойства (Amalina et al., 2022; Pahnila et al., 2023; Yang et al., 2007). Температура процесса пиролиза колеблется от 350 до 1500°C при ограниченном присутствии кислорода: быстрый пиролиз (400-600°C), медленный пиролиз (350-800°C) и газификация (700-1500°C) (Tomczyk et al., 2020). Биочар, полученный при высокой температуре (от 400 до 700°C), характеризуется высокой площадью поверхности, микро-пористостью и повышенной соматичностью и гидрофобностью (Kołodziejka et al., 2012). Процесс приготовления биочара приводит к образованию пористой структуры (Dong et al., 2024). Образующиеся поры подразделяют на микропоры (диаметром менее 2 нм), мезопоры (2–50 нм) и макропоры (более 50 нм). В отличие от гидрочара с ароматической структурой и высокой термической стабильностью, считают, что биочар экономически более эффективен (Gascó et al., 2018; Zhu et al., 2018), обладает большой химической и биологической стабильностью, высокой способностью к катионному обмену, большой удельной площадью поверхности и концентрацией функциональных групп (He et al., 2019; Prapagdee & Tawinteung, 2017). Большинство видов биочара имеют нейтральную или щелочную кислотность и способны повышать pH кислых почв. Положительное воздействие биочара на почву и рост растений связано с присутствием в его составе минералов (K, Ca, P, Na, Mg и т.д.), которые способствуют нейтрализации кислотности почвы, снижению стресса и росту растений (He et al., 2019; Литвинович и др., 2016). Пиролитический биочар является щелочным, используется для рекультивации кислых почв, а гидротермально приготовленный биочар является кислым и может использоваться для рекультивации засоленных почв (Liang et al., 2023).

## *2. Взаимодействие тяжелых металлов в почве с биочаром*

При рекультивации почвы повсеместно применяется биочар из-за его пористой структуры, большой площади поверхности и химического состава (Kabir et al., 2023; Majewska & Hanaka, 2025). Способность биочара сорбировать тяжелые металлы, снижать их подвижность, биодоступность и, следовательно, токсичность в почве продемонстрирована во многих опубликованных работах (Ghosh & Maiti, 2021; Gogoi et al., 2021; Gu et al., 2020; Janus et al., 2020). Механизмы взаимодействия металлов с биочаром в почве подразделяю на прямые (электростатическая адсорбция, ионный обмен, комплексообразование и осаждение) и косвенные (изменение свойств почвы, например, pH, катионообменная емкость, содержание минералов и органического углерода) (He et al., 2019). Поскольку ТМ являются как катионными, так и анионными, они взаимодействуют с анионными и катионными ионами биочара и непосредственно абсорбируются на поверхности материала, тем самым снижая их биодоступность в почве. Поэтому биочар рассматривают, как эффективный адсорбент тяжелых металлов. Способность к катионному обмену делает биочар эффективным инструментом для стабилизации загрязнения почвы и снижения биодоступности токсичных элементов для организмов в зависимости от размера частиц, метода внесения и дозы (Fijałkowska et al., 2021; Narayanan & Ma, 2022; Rees et al., 2014). Анионные металлоиды, включая Cr, Se и As, часто встречаются в почвах с щелочным pH по сравнению с катионными металлоидами, которые плохо адсорбируются отрицательно заряженной почвой (He et al., 2021; Narayanan & Ma, 2022). Стабилизация тяжелых металлов в почве путем применения биочара зависит от типа адсорбента, который, в свою очередь, определяется типом сырья и температурой пиролиза (Aslam et al., 2017; Beesley & Marmiroli, 2011). Например, при загрязнении почвы ионами Cu (II), Zn (II) и Pb (II) адсорбционная способность биочаров увеличивалась в следующем порядке: древесина > рисовая шелуха > подсолнечная шелуха. Добавление в почву биочара из подсолнечной шелухи, древесины и рисовой шелухи привело к повышению эффективности удаления металлов во всех случаях (более 77%), а увеличение процентной адсорбции ионов Cu и Pb составило 9-19%, Zn – 11-21% (Burachevskaya et al., 2023). При сравнении различных адсорбентов (гаше-

ная известь, фосфогипс, костная мука и биочар) в сельскохозяйственной почве, загрязненной As, Cd и Pb, выявлено, что среди сорбентов наибольшей сорбционной стабильностью ионов As ( $0,007 \text{ л мг}^{-1}$ ), Cd ( $0,121 \text{ л мг}^{-1}$ ) и Pb ( $2,273 \text{ л мг}^{-1}$ ) обладал биочар, что доказывает стабильность биочара по сравнению с другими добавками (Lwin et al., 2023).

Однако, помимо положительного влияния от внесения биочара в почву, имеются некоторые ограничения: снижение влажности почвы, усиление эрозии и засоленности, а также снижение биодоступности питательных веществ, необходимых для роста и развития растительного организма (Brtnicky et al., 2021). Вопрос безопасности применения биочара для рекультивации почв и роста растений остается открытым (He et al., 2019; Narayanan & Ma, 2022; Schimmelpfennig & Glaser, 2012). Считают, что содержание катионных и анионных элементов в биочаре, выброс их в почву в процессе «старения» или вдыхание пыли при их использовании представляет эколого-медицинский риск (Gu et al., 2020). Исследования в данной области ограничены, известно, что в процессе «старения» биочара на поверхности образуется широкий спектр функциональных групп (карбоксильные, гидроксильные и фенольные) (Narayanan & Ma, 2022), но при этом процесс «старения» не влияет на способность биочара стабилизировать катионные элементы в почве (Ghosh & Maiti, 2021; Narayanan & Ma, 2022; Rathnayake et al., 2021). Разработка стратегии стабилизации анионных металлов является слабо изученным вопросом, и одним из важных аспектов – правильный подбор биочара (Gupta et al., 2021).

Итак, внесение биочара в почву улучшает поглощение и стабилизацию различных загрязняющих веществ. Считают, что обогащенная биочаром почва может улучшить подвижность металлов и металлоидов, механизм их стабилизации обусловлен увеличением pH почвы (Gupta et al., 2021; Hassan et al., 2024; He et al., 2019; Majewska & Hanaka, 2025; Mamirova et al., 2024; Narayanan & Ma, 2022; Schommer et al., 2024; Song et al., 2016). Биочар сохраняется в почве в течение сотен и тысяч лет. За счет повышения pH, пористости и вододоступности биочар может создать благоприятные условия для развития корневой системы и активности микробных сообществ в почве. Биочар может катализировать биотические и абиотические процессы,

особенно в ризосфере, которые усиливают поступление питательных веществ и их образование растениями, низкий уровень фитотоксинов, стимулируют развитие растений и повышают устойчивость к климатическим воздействиям и внешним стрессорам окружающей среды (Joseph et al., 2021).

### *3. Взаимодействие пестицидов в почве с биочаром*

Сложные структуры почвы и микробные экосистемы, присутствующие в реальных сельскохозяйственных условиях, могут влиять на адсорбцию, биодоступность и долгосрочные эффекты взаимодействия биочара с пестицидами. Биодоступность пестицидов в почве с помощью биочара зависит от многих факторов: химической структуры, физико-химических свойств почвы; структуры пор, удельной поверхности и поверхностных функциональных групп (J. Huang et al., 2023). Поэтому считают, что углубленные исследования механизмов адсорбции биочара помогут продвинуть применение биочара и повысить его эффективность для снижения экологического риска от пестицидов (Dong et al., 2024). В настоящее время биочар рассматривают, как новый стабилизирующий агент, который может адсорбировать пестициды посредством взаимодействия химической (электростатическое притяжение) и физической адсорбции (объем пор, распределение размеров пор и удельная площадь поверхности). Эти два типа адсорбции часто взаимодействуют друг с другом и работают вместе в процессе адсорбции пестицидов (Cheng et al., 2021; Dong et al., 2024; Gogoi et al., 2021). Биочар может сильно адсорбировать пестициды в почве благодаря своим рыхлым и пористым свойствам, большой удельной площади поверхности и поверхностной энергии, а также высокой ароматической структуре (Bahia, 2022). Продемонстрировано, что адсорбция обычно является первым процессом, который начинается сразу после внесения пестицидов в почву. Таким образом, способность биочара адсорбировать пестициды может быть важным фактором, который может влиять на другие процессы, такие как химический транспорт, выщелачивание, биодоступность и экотоксикологическое воздействие на окружающую среду (Khorrgram et al., 2016; Kookana et al., 2011). Адсорбционная способность биочара для гидрофобных и гидрофильных органических

соединений зависит от поверхностных гидрофильных групп, карбонизированных и некарбонизированных частей биочара, общих свойств и пористой поверхности. На поверхности биочара формируется химическая связь с функциональными группами, содержащими кислород и азот, пестицидов, тем самым стабилизируя их в почве (Gogoi et al., 2021). Биочар обладает способностью ускорять процесс деградации пестицидов в почве за счет увеличения популяции почвенных микроорганизмов. Почвенные микроорганизмы используют молекулы пестицидов, как источник питательных веществ и доноров электронов. За счет гидролиза, конъюгации и деградации, они ускоряют процесс минерализации пестицидов в почве (Wu et al., 2019). Однако механизмы, влияющие на экологическую судьбу и поведение пестицидов в почве с биочаром, для снижения экологического риска от пестицидов мало изучены (Khorram et al., 2016). Согласно данным литературы, повышение стабилизации пестицида на биочаре объясняют повышенным содержанием углерода в почве, площадью поверхности, катионообменной способностью (Caga et al., 2022; Luo et al., 2022; Yan et al., 2022). В статье Yan et al. (2022) оценили влияние биочара, полученного из рисовой соломы при 550°C, на распределение имидаклоприда в системе растение-почва-грунтовые воды. Исследование показало, что биочар с высокой площадью поверхности и пористостью может стабилизировать пестицид и снизить его потенциальный вред для растений и грунтовых вод. Отмечено снижение распределения пестицида до 0.57, 0.11 и 13.4% соответственно. Обнаружено, что выщелачивание пестицидов с помощью биочара зависит от структуры макропор почвы. Макропоры увеличивают перемещение загрязняющих веществ через почвенный профиль (Iversen et al., 2012). Применение биочара из сосновой щепы (промышленно пиролизованного при температуре от 300 до 550 °C) снизило кумулятивное выщелачивание атразина на 52% в гомогенизированных почвенных колонках (Delwiche et al., 2014).

Итак, согласно литературным данным, биочар может регулировать поведение загрязняющих веществ, таких как пестициды, тяжелые металлы (Khorram et al., 2016; Meng et al., 2025; Mi et al., 2025), что делает его потенциально полезным для восстановления почвы, загрязненной пестицидами (Lin et al., 2022; Zhang et al., 2019).

#### *4. Механизмы взаимодействия биочара с микроорганизмами*

Одним из главных этапов микробной биотехнологии является иммобилизация микроорганизмов на твердых матрицах, в частности биочаре (Deng et al., 2022; Schommer et al., 2024; Wu et al., 2019; Yu et al., 2025). Поры биочара являются местом обитания микроорганизмов, обеспечивающим убежище и питательные вещества для улучшения колонизации и развития микробных сообществ на поверхности и внутри. Иммобилизация микробных клеток на биочаре зависит от способа пиролиза, сырья и его свойств: площади поверхности, размер пор, pH, гидрофобности, функциональных групп и питательных веществ. Ключевыми факторами, влияющими на эффективность очистки иммобилизованными на биочаре микробными клетками, являются концентрация загрязняющего вещества, время инкубации, температура и pH (Schommer et al., 2023). Считают, что для иммобилизации бактерий более приемлем биочар, пиролизованный при более высоких температурах >500°C (Schommer et al., 2024). В статье K. Huang et al. (2023) обосновывают, что ключевым механизмом, посредством которого биочар влияет на микроорганизмы почвы после внесения их в почву, является следующее: структура пор биочара обеспечивает благоприятную среду обитания для микроорганизмов и способствует их росту; биочар способствует росту и размножению микроорганизмов почвы путем улучшения pH почвы, содержания воды и содержания агрегатов; биочар обеспечивает достаточное количество питательных веществ для микроорганизмов почвы; эффект адсорбции биочара снижает концентрацию и содержание токсичных и вредных веществ в почве, уменьшая токсическое воздействие вредных веществ на микроорганизмы, тем самым демонстрируя хороший потенциал для борьбы с загрязнением почвы.

Выбор микроорганизмов для иммобилизации на биочаре играет важную роль, они должны соответствовать следующим требованиям: а) быть устойчивыми к широкому спектру климатических условий; б) быть способными выживать в среде с высоким уровнем загрязнения; в) предварительно должны быть оценены на способность к деградации загрязнителя; г) должны быть непатогенными; д) демонстрировать рост; е) должны быть экологически безопасны (Schommer et

al., 2023). Обнаружено, что микроорганизмы, обладающие ростостимулирующими свойствами (PGPM) и устойчивостью к металлам при иммобилизации на биочаре смягчают абиотические стрессы, вызванные загрязняющим веществом, и выживают в этих условиях (Dai et al., 2019; Waheed et al., 2025). Иммобилизованные клетки PGPM на биочаре могут повысить эффективность удаления более 60% загрязняющих веществ из воды (Bouabidi et al., 2019). В обзоре Xiang et al. (2022) отмечают, что партнерство растений, PGPM и биочара имеет решающее значение для устойчивой рекультивации органических загрязнителей. Авторы считают, что иммобилизованные клетки демонстрируют более высокую эффективность удаления различных загрязнителей в 8 раз синергически за счет физико-химической сорбции и микробной деградации, чем не иммобилизованные PGPM клетки. Интерес к PGPM обусловлен тем, что они способствуют адаптации растений к стрессовым условиям и влияют на рост и развитие растений через различные механизмы, а именно: фиксацию азота, солюбилизацию фосфатов, синтез сидерофоров, фитогормонов и АЦК-дезаминазы, подавляя развитие фитопатогенных микроорганизмов (Albureikan, 2023; Nurzhanova et al., 2023; Rogia et al., 2022).

Процесс иммобилизации бактерий на биочаре выполняется тремя методами, которые различаются в зависимости от процедур и условий, включая адсорбцию, адаптацию и прикрепление бактерии на поверхности или внутри поры в результате электростатического взаимодействия и ковалентного связывания, и их рост. Механизмами иммобилизации клеток являются в первую очередь адсорбция и образование биопленки на биоугле, что свидетельствует об успешности иммобилизации. Метод адсорбции используют в основном в лабораторных условиях (Bouabidi et al., 2019; Wu et al., 2021). Различают два типа взаимодействия биочара с бактериями: прямое и косвенное. При прямом взаимодействии с бактериями биочар может выступать в качестве защитного барьера между бактериями и средой для бактериальной колонизации; бактерии, обитающие в биочаре, могут быстрее адаптироваться к экологическим стрессам (Ouyang et al., 2023; Zhu et al., 2017). Косвенное взаимодействие биочара с бактериями происходит за счет улучшения физико-химических свойств почвы, облегчающего выживание бактерий, повышающего их численность в почве; влияющего на подвижность тяже-

лых металлов и других вредных веществ в почве, что снижает их биологическое воздействие на бактерии (Chen et al., 2021). Отмечено, что не все биочары подходят для использования в качестве носителей для микробных клеток, жизнеспособных и биodeградирующих загрязняющие вещества. Для улучшенной ремедиации требуются материал-носитель с высокими характеристиками связывания клеток. Восстановительный процесс почвы, загрязненной тяжелыми металлами зависит от способа иммобилизации бактерий на биочаре (Ouyang et al., 2024). Рекультивации почвы зависит от механизма взаимодействия биочара и бактерий с тяжелыми металлами, при этом бактерии играют основную роль в данном процессе (Cheng et al., 2021; Ouyang et al., 2023; Wu et al., 2019). Например, биочар с очень высоким pH, чрезмерным количеством золы и неорганических или органических загрязнителей может быть токсичным и/или бесполезным для галофобных или ацидофильных растений и бактерий (Xiang et al., 2022). Например, при иммобилизации штамма *Bacillus cereus* RC-1 на биочаре, полученном из рисовой соломы, куриного помета и осадков сточных вод, выявлено, что биочар, полученный из рисовой соломы адсорбировал ионы  $Cd^{2+}$  в количестве  $159 \text{ мг г}^{-1}$  (Huang et al., 2020). Биопрепарат, созданный на основе биочара, полученного из кокосовой шелухи в качестве материала-носителя и *Arthrobacter subterraneus* в качестве активного ингредиента, эффективно снижал содержание взрывчатых веществ в почве: до 86.0% гексагидро-1,3,5-тринитро-1,3,5-триазина и 80.4% октагидро-1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетразоцина при исходной их концентрации в почве  $50 \text{ мг кг}^{-1}$ . Время выживания *Arthrobacter subterraneus* на биочаре составляло 6 месяцев (Sharma et al., 2023). На стратегию выживаемости микроорганизмов на биочаре влияют следующие факторы: доступность биогенных элементов, (углерод, азот, калии и фосфор в водорастворимой форме), наличие макропор, которые обеспечивает необходимую влажность, газообмен, снабжение кислородом, конкурентоспособность (Manikandan et al., 2023). Например, сорбция клеток *Azospirillum brasilense* SR80 на коммерческом биочаре (ООО “ДианАгро”, Россия) из древесины березы в условиях аэрации на качалке достигает 38% уже через 2 ч культивирования. Временном интервале 2-6 ч наблюдается снижение за счет десорбции не закрепившихся клеток и только через 24 ч эффективность иммобилизации составляет 53%. Численность

иммобилизованных клеток *A. brasilense* SR80 при культивировании в среде Луриа-Бертани в условиях аэрации на качалке достигает  $9.3 \times 10^9$  КОЕ г<sup>-1</sup> сухого биочара. Отмечено, что использование биочара при температуре 22 и 30°C сопровождалось увеличением биodeградации нефти до 29 и 35%, соответственно, относительно суспендированных клеток (Muratova et al., 2022).

Таким образом, микробная иммобилизация на биочаре, как новая технология представляет собой многообещающее решение для восстановления загрязненных органическими и неорганическими загрязнителями среды и вопроса повышении продуктивности в аграрном секторе. Однако, практическое совместное использование биочара и бактерий в массовом производстве затруднена сложностью их взаимодействия с учетом климатических условий и условий среды, дозировки, сроков годности; стабильности биочара, длительности транспортировки, хранения и экологической безопасности (Dai et al., 2019).

### Заключение

Микроорганизмы являются важным компонентом ремедиации почв, загрязнённых органическими и неорганическими токсикантами. Их иммобилизация на биочаре способствует снижению токсичности, подвижности и биодоступности загрязнителей, а также повышает эффективность процессов ремедиации. Несмотря на значительный прогресс в изучении биочара как инструмента восстановления деградированных загрязнённых почв, ряд фундаментальных и прикладных вопросов остается недостаточно изученным. Практическое совместное использование биочара и микроорганизмов в массовом производстве затруднено сложностью их взаимодействия, зависящего от климатических

условий, свойств окружающей среды, дозировки, сроков хранения, стабильности биочара, особенностей транспортировки, а также требований экологической безопасности.

В перспективе особое внимание следует уделить разработке технологий, основанных на использовании биочара в качестве носителя микроорганизмов, обладающих ростостимулирующими свойствами, а также созданию устойчивых микробных консорциумов, способных обеспечивать деградацию пестицидов и других стойких органических загрязнителей, одновременно способствуя иммобилизации тяжёлых металлов. Реализация этих направлений позволит повысить эффективность ремедиации и будет способствовать разработке устойчивых технологий восстановления загрязнённых экосистем.

### Конфликт интересов

Все авторы прочитали и ознакомлены с содержанием статьи и не имеют конфликта интересов.

### Источник финансирования

Исследование проведено в рамках проекта AP23487419, поддержанного Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

### Вклад авторов

Концептуализация, А.А.Н.; Методология, А.С.Н. и Ж.Ж.; Программное обеспечение, А.М.; Формальный анализ, А.Ю.М.; Исследование, А.С.Н. и Ж.Ж.; Курирование данных, А.М.; Написание текста – Подготовка первоначального варианта, А.А.Н., А.Ю.М. и А.М.; Написание текстов – рецензирование и редактирование, А.А.Н., А.Ю.М. и А.М.; Администрирование проекта, А.А.Н.; Привлечение финансирования, А.А.Н.

### Литература

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Albureikan, M. O. I. (2023). Rhizosphere microorganisms with different strategies and mechanisms to enhance plant growth in the occurrence of different environmental stress factors. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 17(3), 1341–1355. <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.3.59>
- Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review. *Cleaner Materials*, 3, 100045. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100045>

Aslam, Z., Khalid, M., Naveed, M., Shahid, M., & Aon, M. (2017). Evaluation of green waste and poplar twigs biochar produced at low and high pyrolytic temperature for efficient removal of metals from water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(11), 432. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3615-y>

Azzaz, A. A., Khiari, B., Jellali, S., Ghimbeu, C. M., & Jeguirim, M. (2020). Hydrochars production, characterization and application for wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109882>

Bahia, W. (2022). Adsorption-desorption behavior and pesticide bioavailability of biochar in soil. *Science Insights*, 41(6), 725–731. <https://doi.org/10.15354/si.22.re093>

Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Reeves, R. D., & Smith, J. A. C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In N. Terry & G. S. Banuelos (Eds.), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367803148>

Baubekova, A., Akindykova, A., Mamirova, A., Dumat, C., & Jurjanz, S. (2021). Evaluation of environmental contamination by toxic trace elements in Kazakhstan based on reviews of available scientific data. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43315–43328. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14979-z>

Beesley, L., & Marmiroli, M. (2011). The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 159(2), 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016>

Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., Shah, A., Poudel, A., Pun, A. B., Bhat, M. A., Mandal, D. L., Shah, S., Zhihao, D., Tan, Q., & Hu, C.-X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*, 84(1), 19–37. <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00756-6>

Boorboori, M. R., & Lackóová, L. (2023). Biochar; an effective factor in improving phytoremediation of metal(iod)s in polluted sites. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1253144>

Bouabidi, Z. B., El-Naas, M. H., & Zhang, Z. (2019). Immobilization of microbial cells for the biotreatment of wastewater: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0795-7>

Brtnicky, M., Datta, R., Holatko, J., Bielska, L., Gusiatin, Z. M., Kucerik, J., Hammerschmidt, T., Danish, S., Radziemska, M., Mravcova, L., Fahad, S., Kintl, A., Sudoma, M., Ahmed, N., & Pecina, V. (2021). A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Science of The Total Environment*, 796, 148756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>

Brunet, R. (2001). Hauts lieux et mauvais lieux du Kazakhstan. *L'Espace géographique*, 30(1), 37–51. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/eg.301.0037>

Burachevskaya, M., Minkina, T., Bauer, T., Lobzenko, I., Fedorenko, A., Mazarji, M., Sushkova, S., Mandzhiyeva, S., Nazarenko, A., Butova, V., Wong, M. H., & Rajput, V. D. (2023). Fabrication of biochar derived from different types of feedstocks as an efficient adsorbent for soil heavy metal removal. *Scientific Reports*, 13(1), 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27638-9>

Cara, I. G., ōpa, D., Puiu, I., & Jitǎreanu, G. (2022). Biochar a promising strategy for pesticide-contaminated soils. *Agriculture*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101579>

Chen, W., Zeng, F., Liu, W., Bu, J., Hu, G., Xie, S., Yao, H., Zhou, H., Qi, S., & Huang, H. (2021). Organochlorine pesticides in karst soil: Levels, distribution, and source diagnosis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111589>

Cheng, N., Wang, B., Wu, P., Lee, X., Xing, Y., Chen, M., & Gao, B. (2021). Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review. *Environmental Pollution*, 273, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116448>

Dai, Y., Zhang, N., Xing, C., Cui, Q., & Sun, Q. (2019). The adsorption, regeneration and engineering applications of biochar for removal organic pollutants: A review. *Chemosphere*, 223, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.161>

Deepika, & Haritash, A. K. (2024). Phytoremediation of chromium (VI)-contaminated soil by *Euphorbia tithymaloides* L. and metagenomic analysis of rhizospheric bacterial community. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(8), 512. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07305-z>

Delwiche, K. B., Lehmann, J., & Walter, M. T. (2014). Atrazine leaching from biochar-amended soils. *Chemosphere*, 95, 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.043>

Deng, M., Li, K., Yan, Y.-J., Huang, F., & Peng, D. (2022). Enhanced cadmium removal by growing *Bacillus cereus* RC-1 immobilized on different magnetic biochars through simultaneous adsorption and bioaccumulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 18495–18507. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17125-x>

Dong, X., Chu, Y., Tong, Z., Sun, M., Meng, D., Yi, X., Gao, T., Wang, M., & Duan, J. (2024). Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, 116019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019>

Fang, J., Gao, B., Chen, J., & Zimmerman, A. R. (2015). Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal*, 267, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2015.01.026>

Fijałkowska, G., Wiśniewska, M., Szewczuk-Karpisz, K., Jędruchiewicz, K., & Oleszczuk, P. (2021). Comparison of lead(II) ions accumulation and bioavailability on the montmorillonite and kaolinite surfaces in the presence of polyacrylamide soil flocculant. *Chemosphere*, 276, 130088. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130088>

Forján, R., Rodríguez-Vila, A., Cerqueira, B., Covelo, E. F., Marcet, P., & Asensio, V. (2018). Comparative effect of compost and technosol enhanced with biochar on the fertility of a degraded soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 610. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6997-4>

Gamalero, E., & Glick, B. R. (2024). Use of plant growth-promoting bacteria to facilitate phytoremediation. *AIMS Microbiology*, 10(2), 415–448. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2024021>

- Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Álvarez, M. L., Saa, A., & Méndez, A. (2018). Biochars and hydrochars prepared by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of pig manure. *Waste Management*, 79, 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.015>
- Ghosh, D., & Maiti, S. K. (2021). Biochar assisted phytoremediation and biomass disposal in heavy metal contaminated mine soils: A review. *International Journal of Phytoremediation*, 23(6), 559–576. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1840510>
- Gogoi, L., Narzari, R., Chutia, R. S., Borkotoki, B., Gogoi, N., & Katakai, R. (2021). Chapter Two – Remediation of heavy metal contaminated soil: Role of biochar. In A. K. Sarmah (Ed.), *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection* (Vol. 7, pp. 39–63). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2021.08.002>
- Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Zeng, G., Chen, S., Wang, R., Xu, P., Cheng, M., Zhang, C., & Xue, W. (2019). Biochar facilitated the phytoremediation of cadmium contaminated sediments: Metal behavior, plant toxicity, and microbial activity. *Science of The Total Environment*, 666, 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.215>
- Grand View Research. (2024). *Biochar Market Size, Share & Trends Analysis Report by Technology (Gasification, Pyrolysis), By Application (Agriculture, Others), By Region (North America, Asia Pacific), And Segment Forecasts, 2024–2030* (Nos. 978-1-68038-681-3; p. 100). Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biochar-market>
- Gu, J., Yao, J., Duran, R., Sunahara, G., & Zhou, X. (2020). Alteration of mixture toxicity in nonferrous metal mine tailings treated by biochar. *Journal of Environmental Management*, 265, 110511. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110511>
- Gunasundari, E., & Senthil Kumar, P. (2017). Higher adsorption capacity of *Spirulina platensis* alga for Cr(VI) ions removal: Parameter optimisation, equilibrium, kinetic and thermodynamic predictions. *IET Nanobiotechnology*, 11(3), 317–328. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2016.0121>
- Gupta, A., Sharma, V., Sharma, K., Kumar, V., Choudhary, S., Mankotia, P., Kumar, B., Mishra, H., Moulick, A., Ekielski, A., & Mishra, P. K. (2021). A review of adsorbents for heavy metal decontamination: Growing approach to wastewater treatment. *Materials*, 14(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/ma14164702>
- Hassan, N. S., Jalil, A. A., Izzuddin, N. M., Bahari, M. B., Hatta, A. H., Kasmani, R. M., & Norazahar, N. (2024). Recent advances in lignocellulosic biomass-derived biochar-based photocatalyst for wastewater remediation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 163, 105670. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105670>
- He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, 252, 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151>
- He, M., Xiong, X., Wang, L., Hou, D., Bolan, N. S., Ok, Y. S., Rinklebe, J., & Tsang, D. C. W. (2021). A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125378. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>
- Hesham, A., Awad, Y., Jahin, H., El-Korashy, S., Maher, S., Kalil, H., & Khairy, G. (2021). Hydrochar for industrial wastewater treatment: An overview on its advantages and applications. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 11(3), 626.
- Huang, F., Li, K., Wu, R.-R., Yan, Y.-J., & Xiao, R.-B. (2020). Insight into the Cd<sup>2+</sup> biosorption by viable *Bacillus cereus* RC-1 immobilized on different biochars: Roles of bacterial cell and biochar matrix. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122743>
- Huang, J., Tan, X., Ali, I., Duan, Z., Naz, I., Cao, J., Ruan, Y., & Wang, Y. (2023). More effective application of biochar-based immobilization technology in the environment: Understanding the role of biochar. *Science of The Total Environment*, 872, 162021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162021>
- Huang, K., Zhang, J., Tang, G., Bao, D., Wang, T., & Kong, D. (2023). Impacts and mechanisms of biochar on soil microorganisms. *Plant, Soil and Environment*, 69(2), 45–54. <https://doi.org/10.17221/348/2022-PSE>
- Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2(4), 421–438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Iversen, B. V., Lamandé, M., Torp, S. B., Greve, M. H., Heckrath, G., de Jonge, L. W., Moldrup, P., & Jacobsen, O. H. (2012). Macropores and macropore transport: Relating basic soil properties to macropore density and soil hydraulic properties. *Soil Science*, 177(9), 535. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31826dd155>
- Janus, A., Waterlot, C., Douay, F., & Pelfrène, A. (2020). *Ex situ* evaluation of the effects of biochars on environmental and toxicological availabilities of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 1852–1869. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06764-w>
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z. (Han), & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Kabir, E., Kim, K.-H., & Kwon, E. E. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>
- Khan, W. U., Ahmad, S. R., Yasin, N. A., Ali, A., & Ahmad, A. (2017). Effect of *Pseudomonas fluorescens* RB4 and *Bacillus subtilis* 189 on the phytoremediation potential of *Catharanthus roseus* (L.) in Cu and Pb-contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*, 19(6), 514–521. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1254154>
- Khanzada, A. K., Al-Hazmi, H. E., Kurniawan, T. A., Majtacz, J., Piechota, G., Kumar, G., Ezzati, P., Saeb, M. R., Rabiee, N., Karimi-Maleh, H., Lima, E. C., & Mąkinia, J. (2024). Hydrochar as a bio-based adsorbent for heavy metals removal: A review of production processes, adsorption mechanisms, kinetic models, regeneration and reusability. *Science of The Total Environment*, 945, 173972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173972>

- Khawkomol, S., Neamchan, R., Thongsamer, T., Vinitnantharat, S., Panpradit, B., Sohsalam, P., Werner, D., & Mrozik, W. (2021). Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management. *Sustainability*, *13*(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/su13158147>
- Khorram, M. S., Zhang, Q., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H., & Yu, Y. (2016). Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *Journal of Environmental Sciences*, *44*, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.027>
- Kidd, P. S., Álvarez-López, V., Becerra-Castro, C., Cabello-Conejo, M., & Prieto-Fernández, Á. (2017). Chapter Three— Potential role of plant-associated bacteria in plant metal uptake and implications in phytotechnologies. In A. Cuypers & J. Vangronsveld (Eds.), *Advances in Botanical Research* (Vol. 83, pp. 87–126). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.004>
- Kołodźńska, D., Wnętrzak, R., Leahy, J. J., Hayes, M. H. B., Kwapiński, W., & Hubicki, Z. (2012). Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal. *Chemical Engineering Journal*, *197*, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.025>
- Kononchuk, O., Pidlisnyuk, V., Mamirova, A., Khomenchuk, V., Herts, A., Grycová, B., Klemencová, K., Leštinský, P., & Shapoval, P. (2022). Evaluation of the impact of varied biochars produced from *M. × giganteus* waste and application rate on the soil properties and physiological parameters of *Spinacia oleracea* L. *Environmental Technology & Innovation*, *28*, 102898. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102898>
- Kookana, R. S., Sarmah, A. K., Van Zwieten, L., Krull, E., & Singh, B. (2011). Chapter Three – Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 112, pp. 103–143). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00003-2>
- Lekshmi, S., Lekshmi, A. A., Achuthavari, D., & Chandran, S. S. (2024). Critical analysis of sustainable ways of removing insidious pollutants from the environment through phytoremediation techniques. *Chemistry and Ecology*, *40*(8), 892–917. (world). <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2365164>
- Liang, J., Chang, J., Xie, J., Yang, L., Sheteiwy, M. S., Moustafa, A.-R. A., Zaghoul, M. S., & Ren, H. (2023). Microorganisms and biochar improve the remediation efficiency of *Paspalum vaginatum* and *Pennisetum alopecuroides* on cadmium-contaminated soil. *Toxics*, *11*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/toxics11070582>
- Lin, H., Liu, C., Li, B., & Dong, Y. (2021). *Trifolium repens* L. regulated phytoremediation of heavy metal contaminated soil by promoting soil enzyme activities and beneficial rhizosphere associated microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, *402*, 123829. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123829>
- Lin, Q., Tan, X., Almatrafi, E., Yang, Y., Wang, W., Luo, H., Qin, F., Zhou, C., Zeng, G., & Zhang, C. (2022). Effects of biochar-based materials on the bioavailability of soil organic pollutants and their biological impacts. *Science of The Total Environment*, *826*, 153956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153956>
- Llovet, A., Mattana, S., Chin-Pampillo, J., Gascó, G., Sánchez, S., Mondini, C., Briones, M. J. I., Márquez, L., Alcañiz, J. M., Ribas, A., & Domene, X. (2021). Long-term effects of gasification biochar application on soil functions in a Mediterranean agroecosystem: Higher addition rates sequester more carbon but pose a risk to soil faunal communities. *Science of The Total Environment*, *801*, 149580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149580>
- Luo, Z., Yao, B., Yang, X., Wang, L., Xu, Z., Yan, X., Tian, L., Zhou, H., & Zhou, Y. (2022). Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: A review. *Chemosphere*, *287*, 132113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132113>
- Lwin, C. S., Kim, Y.-N., Lee, M., & Kim, K.-R. (2023). Sorption of As, Cd, and Pb by soil amendments: In situ immobilization mechanisms and implementation in contaminated agricultural soils. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(48), 105732–105741. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29298-8>
- Ma, L., Zhang, L., Zhang, S., Zhou, M., Huang, W., Zou, X., He, Z., & Shu, L. (2024). Soil protists are more resilient to the combined effect of microplastics and heavy metals than bacterial communities. *Science of The Total Environment*, *906*, 167645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167645>
- Mahmood Al-Nuaimy, M. N., Azizi, N., Nural, Y., & Yabalak, E. (2024). Recent advances in environmental and agricultural applications of hydrochars: A review. *Environmental Research*, *250*, 117923. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117923>
- Majewska, M., & Hanaka, A. (2025). Biochar in the bioremediation of metal-contaminated soils. *Agronomy*, *15*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020273>
- Mamirova, A., Pidlisnyuk, V., Amirbekov, A., Ševců, A., & Nurzhanova, A. (2021). Phytoremediation potential of *Miscanthus sinensis* And. In organochlorine pesticides contaminated soil amended by Tween 20 and Activated carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(13), 16092–16106. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11609-y>
- Mamirova, A., Pidlisnyuk, V., Hrabak, P., Shapoval, P., & Nurzhanova, A. (2024). Biochar-supported phytoremediation of dredged sediments contaminated by HCH isomers and trace elements using *Paulownia tomentosa*. *Sustainability*, *16*(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su16209080>
- Mamirova, A., Nurzhanova, A., & Pidlisnyuk, V. (2019). POP pesticides and reclamation methods. *Reports of The National Academy of Sciences of The Republic of Kazakhstan*, *6*(328), 21–34. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1483.164>
- Manikandan, S., Vickram, S., Subbaiya, R., Karmegam, N., Woong Chang, S., Ravindran, B., & Kumar Awasthi, M. (2023). Comprehensive review on recent production trends and applications of biochar for greener environment. *Bioresource Technology*, *388*, 129725. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129725>
- Maroušek, J., Strunecký, O., & Stehel, V. (2019). Biochar farming: Defining economically perspective applications. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*(7), 1389–1395. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01728-7>
- Meng, F., Wang, Y., & Wei, Y. (2025). Advancements in biochar for soil remediation of heavy metals and/or organic pollutants. *Materials*, *18*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma18071524>

- Mi, L., Liu, Y., Huang, Q., Zhao, L., Qin, X., Sun, Y., & Li, B. (2025). Enhanced adsorption and regulation mechanism of ball milling-modified biochar on Cd and atrazine in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(9), 5091–5105. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36015-0>
- Muratova, A. Yu., Panchenko, L. V., Dubrovskaya, E. V., Lyubun', E. V., Golubev, S. N., Sungurtseva, I. Yu., Zakharevich, A. M., Biktasheva, L. R., Galitskaya, P. Yu., & Turkovskaya, O. V. (2022). Bioremediation potential of biochar-immobilized cells of *Azospirillum brasilense*. *Microbiology*, 91(5), 514–522. <https://doi.org/10.1134/S0026261722601336>
- Narayanan, M., & Ma, Y. (2022). Influences of biochar on bioremediation/phytoremediation potential of metal-contaminated soils. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.929730>
- Nebeská, D., Trögl, J., Ševců, A., Špánek, R., Marková, K., Davis, L., Burdová, H., & Pidlisnyuk, V. (2021). *Miscanthus × giganteus* role in phytodegradation and changes in bacterial community of soil contaminated by petroleum industry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224, 112630. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112630>
- Nguyen, T.-B., Sherpa, K., Bui, X.-T., Nguyen, V.-T., Vo, T.-D.-H., Ho, H.-T.-T., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2023). Biochar for soil remediation: A comprehensive review of current research on pollutant removal. *Environmental Pollution*, 337, 122571. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122571>
- Novak, J. M., Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Watts, D. W., Spokas, K. A., Trippe, K. M., Sigua, G. C., & Johnson, M. G. (2018). Remediation of an acidic mine spoil: *Miscanthus* biochar and lime amendment affects metal availability, plant growth, and soil enzyme activity. *Chemosphere*, 205, 709–718. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.107>
- Nsanganwimana, F., Pourrut, B., Mench, M., & Douay, F. (2014). Suitability of *Miscanthus* species for managing inorganic and organic contaminated land and restoring ecosystem services. A review. *Journal of Environmental Management*, 143, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.027>
- Nurzhanova, A. A., Pidlisnyuk, V., Berzhanova, R., Nurmagambetova, A. S., Terletskaia, N., Omirbekova, N., Berkinbayev, G., & Mamirova, A. (2023). PGPR-driven phytoremediation and physiobiochemical response of *Miscanthus × giganteus* to stress induced by the trace elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42), 96098–96113. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29031-5>
- Oro, C. E. D., Saorin Puton, B. M., Venquiaruto, L. D., Dallago, R. M., & Tres, M. V. (2024). Effective microbial strategies to remediate contaminated agricultural soils and conserve functions. *Agronomy*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112637>
- Ouyang, P., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., Luo, Y., & Ma, Y. (2023). Integrating biochar and bacteria for sustainable remediation of metal-contaminated soils. *Biochar*, 5(1), 63. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00265-3>
- Ouyang, X., Lin, H., Hu, Z., Zheng, Y., Li, P., & Huang, W. (2024). Effect of biochar structure on H<sub>2</sub>S emissions during sludge aerobic composting: Insights into microscale characterization and microbial mechanism. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(11), 12469–12482. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03388-y>
- Pahnila, M., Koskela, A., Sulasalmi, P., & Fabritius, T. (2023). A review of pyrolysis technologies and the effect of process parameters on biocarbon properties. *Energies*, 16(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/en16196936>
- Pichtel, J. (2016). Oil and gas production wastewater: Soil contamination and pollution prevention. *Applied and Environmental Soil Science*, 2016, e2707989. <https://doi.org/10.1155/2016/2707989>
- Pidlisnyuk, V., Newton, R. A., & Mamirova, A. (2021). *Miscanthus* biochar value chain—A review. *Journal of Environmental Management*, 290, 112611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112611>
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56(1), 15–39. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>
- Poria, V., Dębiec-Andrzejewska, K., Fiodor, A., Lyzohub, M., Ajjah, N., Singh, S., & Pranaw, K. (2022). Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) integrated phytotechnology: A sustainable approach for remediation of marginal lands. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.999866>
- Prapagdee, S., & Tawinteung, N. (2017). Effects of biochar on enhanced nutrient use efficiency of green bean, *Vigna radiata* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(10), 9460–9467. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8633-1>
- Radziemska, M., Gusiatin, Z. M., Mazur, Z., Hammerschmidt, T., Bęś, A., Kintl, A., Galiova, M. V., Holatko, J., Blazejczyk, A., Kumar, V., & Brtnický, M. (2022). Biochar-assisted phytostabilization for potentially toxic element immobilization. *Sustainability*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su14010445>
- Rathnayake, D., Rego, F., Van Poucke, R., Bridgwater, A. V., Mašek, O., Meers, E., Wang, J., Yang, Y., & Ronsse, F. (2021). Chemical stabilization of Cd-contaminated soil using fresh and aged wheat straw biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(8), 10155–10166. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11574-6>
- Rees, F., Simonnot, M. O., & Morel, J. L. (2014). Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 149–161. <https://doi.org/10.1111/ejss.12107>
- Reyhaniatabar, A., Frahadi, E., Ramezanzadeh, H., & Oustan, S. (2020). Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(2), 547–561. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-26722-en.html>
- Safirova, E. (2019). The mineral industry of Kazakhstan. In *2015 Minerals Yearbook [Advanced release]* (p. 24.1-24.16). US Department of the Interior & US Geological Survey.
- Schimmelpfennig, S., & Glaser, B. (2012). One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 1001–1013. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146>

- Schommer, V. A., Nazari, M. T., Melara, F., Braun, J. C. A., Rempel, A., dos Santos, L. F., Ferrari, V., Colla, L. M., Dettmer, A., & Piccin, J. S. (2024). Techniques and mechanisms of bacteria immobilization on biochar for further environmental and agricultural applications. *Microbiological Research*, 278, 127534. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127534>
- Schommer, V. A., Vanin, A. P., Nazari, M. T., Ferrari, V., Dettmer, A., Colla, L. M., & Piccin, J. S. (2023). Biochar-immobilized *Bacillus* spp. for heavy metals bioremediation: A review on immobilization techniques, bioremediation mechanisms and effects on soil. *Science of The Total Environment*, 881, 163385. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163385>
- Sharma, K., Sharma, P., & Sangwan, P. (2023). Bioremediation of RDX and HMX contaminated soil employing a biochar-based bioformulation. *Carbon Research*, 2(1), 33. <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00068-y>
- Sharma, R., Kumar, R., Hajam, Y. A., & Rani, R. (2022). Chapter 21—Role of biotechnology in phytoremediation. In R. A. Bhat, F. M. P. Tonelli, G. H. Dar, & K. Hakeem (Eds.), *Phytoremediation* (pp. 437–454). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89874-4.00021-2>
- Song, J.-S., Lim, S.-H., Lim, Y., Nah, G., Lee, D., & Kim, D.-S. (2016). Herbicide-based weed management in miscanthus sacchariflorus. *BioEnergy Research*, 9(1), 326–334. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9693-z>
- Tarla, D. N., Erickson, L. E., Hettiarachchi, G. M., Amadi, S. I., Galkaduwa, M., Davis, L. C., Nurzhanova, A., & Pidlisnyuk, V. (2020). Phytoremediation and bioremediation of pesticide-contaminated soil. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4), Article 4. Scopus. <https://doi.org/10.3390/app10041217>
- Tomczyk, A., Sokółowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Tsao, D. T. (2003). Overview of phytotechnologies. In D. T. Tsao (Ed.), *Phytoremediation* (Vol. 78, pp. 1–50). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-45991-X\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-45991-X_1)
- Upadhyayula, V. K. K., Deng, S., Smith, G. B., & Mitchell, M. C. (2009). Adsorption of *Bacillus subtilis* on single-walled carbon nanotube aggregates, activated carbon and NanoCeram™. *Water Research*, 43(1), 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.09.023>
- Wagner, A., & Kaupenjohann, M. (2015). Biochar addition enhanced growth of *Dactylis glomerata* L. and immobilized Zn and Cd but mobilized Cu and Pb on a former sewage field soil. *European Journal of Soil Science*, 66(3), 505–515. <https://doi.org/10.1111/ejss.12246>
- Waheed, A., Xu, H., Qiao, X., Aili, A., Yiremaikebayi, Y., Haitao, D., & Muhammad, M. (2025). Biochar in sustainable agriculture and climate mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. *Biomass and Bioenergy*, 193, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107531>
- Wan, X., Lei, M., & Chen, T. (2016). Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 563–564, 796–802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.080>
- Wu, B., Wang, Z., Zhao, Y., Gu, Y., Wang, Y., Yu, J., & Xu, H. (2019). The performance of biochar-microbe multiple biochemical material on bioremediation and soil micro-ecology in the cadmium aged soil. *Science of The Total Environment*, 686, 719–728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.041>
- Wu, J., Fu, X., Zhao, L., Lv, J., Lv, S., Shang, J., Lv, J., Du, S., Guo, H., & Ma, F. (2024). Biochar as a partner of plants and beneficial microorganisms to assist in-situ bioremediation of heavy metal contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 923, 171442. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171442>
- Wu, P., Wang, Z., Bhatnagar, A., Jeyakumar, P., Wang, H., Wang, Y., & Li, X. (2021). Microorganisms-carbonaceous materials immobilized complexes: Synthesis, adaptability and environmental applications. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125915>
- Xiang, L., Harindintwali, J. D., Wang, F., Redmile-Gordon, M., Chang, S. X., Fu, Y., He, C., Muhoza, B., Brahushi, F., Bolan, N., Jiang, X., Ok, Y. S., Rinklebe, J., Schaeffer, A., Zhu, Y., Tiedje, J. M., & Xing, B. (2022). Integrating biochar, bacteria, and plants for sustainable remediation of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 16546–16566. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02976>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Yan, P., Zou, Z., Li, X., Zhang, L., Zhang, L., Fu, J., & Wenyan, H. (2022). Biochar changed the distribution of imidacloprid in a plant–soil–groundwater system. *Chemosphere*, 307, 136213. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136213>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yu, K., Wang, Z., Yang, W., Li, S., Wu, D., Zheng, H., Ye, Z., Yang, S., & Liu, D. (2025). Application of biochar-immobilized *Bacillus megaterium* for enhancing phosphorus uptake and growth in rice. *Plants*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/plants14020214>
- Zhang, M., Muhammad, R., Zhang, L., Xia, H., Cong, M., & Jiang, C. (2019). Investigating the effect of biochar and fertilizer on the composition and function of bacteria in red soil. *Applied Soil Ecology*, 139, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.021>
- Zhang, Y., Chen, P., Liu, S., Peng, P., Min, M., Cheng, Y., Anderson, E., Zhou, N., Fan, L., Liu, C., Chen, G., Liu, Y., Lei, H., Li, B., & Ruan, R. (2017). Effects of feedstock characteristics on microwave-assisted pyrolysis – A review. *Bioresource Technology*, 230, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.046>
- Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., & Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution*, 227, 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.032>

Zhu, X., Li, C., Li, J., Xie, B., Lü, J., & Li, Y. (2018). Thermal treatment of biochar in the air/nitrogen atmosphere for developed mesoporosity and enhanced adsorption to tetracycline. *Bioresource Technology*, 263, 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.041>

Литвинович, А. В., Хаммам, А. А. М., Лаврищев А. В., & Павлова, О. Ю. (2016). Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов). *Агрохимия*, 2016, 9, 39-46.

**Сведения об авторах:**

Асиль Нуржанова – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории физиологии и биохимии растений Института биологии и биотехнологии растений (Алматы, Казахстан, e-mail: gen\_asil@mail.ru).

Асия Нурмагамбетова – старший научный сотрудник лаборатории физиологии и биохимии растений Института биологии и биотехнологии растений, (Алматы, Казахстан, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Анна Муратова – доктор биологических наук, заведующая лабораторией экологической биотехнологии Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ Саратовский научный центр РАН (Саратов, Российская Федерация, email: muratova\_a@ibppm.ru).

Жадыра Жумашева – научный сотрудник лаборатории физиологии и биохимии растений Института биологии и биотехнологии растений (Алматы, Казахстан, e-mail: zhoomash.zh@mail.ru).

Айгерим Мамирова (автор корреспонденции) – Ph.D., ассоциированный профессор кафедры биотехнология факультета биологии и биотехнологии Казахского Национального Университета им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

**Information about the authors:**

Asil Nurzhanova – Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of the Institute of Plant Biology and Biotechnology (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gen\_asil@mail.ru).

Assiya Nurmagambetova – Senior Researcher of the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of the Institute of Plant Biology and Biotechnology (Almaty, Kazakhstan, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Anna Muratova – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Environmental Biotechnology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Federal Research Center “Saratov Scientific Center” of the Russian Academy of Sciences (Saratov, Russian Federation, e-mail: muratova\_a@ibppm.ru).

Zhadyra Zhumasheva – Researcher of the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of the Institute of Plant Biology and Biotechnology (Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhoomash.zh@mail.ru).

Aigerim Mamirova (corresponding author) – Ph.D., Associate Professor at the Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

**Авторлар туралы мәлімет:**

Асиль Нуржанова – биология ғылымдарының докторы, Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының Өсімдіктер физиологиясы және биохимиясы зертханасының бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: gen\_asil@mail.ru).

Асия Нурмагамбетова – Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының Өсімдіктер физиологиясы және биохимиясы зертханасының аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Анна Муратова – биология ғылымдарының докторы, РФЗИ «Саратов ғылыми орталығы» РАН-ның Өсімдіктер мен микроағзалардың биохимиясы және физиологиясы институтының экологиялық биотехнология лабораториясының меңгерушісі (Саратов, Ресей Федерациясы, e-mail: muratova\_a@ibppm.ru).

Жадыра Жумашева – Өсімдіктер физиологиясы және биохимиясы зертханасының ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: zhoomash.zh@mail.ru).

Айгерим Мамирова (корреспонденттік автор) – Ph.D., әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультетінің Биотехнология кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

Поступило 22 мая 2025 года

Принято 15 июня 2026 года