

УДК 66.092-977, 631.879, 631.421.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-230-269



Ссылки для цитирования:

Дрягина А.А., Пономарев К.О., Кремлева Т.А., Елина Е.И., Шулаев Н.А., Хайнак Л.М. Влияние высокопористых биоуглей на свойства тепличных торфяных субстратов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 126. С. 230-269. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-230-269

Cite this article as:

Dryagina A.A., Ponomarev K.O., Kremleva T.A., Elina E.I., Shulaev N.A., Khainak L.M., The effect of highly porous biochar on the properties of greenhouse peat substrates, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 126, pp. 230-269, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-126-230-269

Благодарность:

Комплексные исследования характеристик биоуглей проведены в рамках Госзадания № FEWZ-2024-0013 (Научно-технические основы и прикладные решения ресурсоэффективной термической переработки органического сырья с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью для энергетической, металлургической и сельскохозяйственной отраслей). Исследование макро- и микроэлементного состава торфяных субстратов выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-76-01011 “Разработка высокопродуктивного субстрата с использованием биоугольных мелиорантов из термически переработанного органического сырья для выращивания микрозелени и овощной низкорослой продукции” (<https://rscf.ru/project/23-76-01011/>). Авторы искренне выражают благодарность Центру коллективного пользования “Рациональное природопользование и физико-химические исследования” Тюменского государственного университета за неоценимую поддержку в проведении аналитических исследований.

Acknowledgments:

Comprehensive studies of biochar characteristics were carried out under State assignment No. FEWZ-2024-0013 (Scientific and technical foundations and applied solutions for resource-efficient thermal processing of organic raw materials to produce high value-added products for the energy, metallurgical and agricultural industries). The research of macro- and microelement composition of peat substrates was financially supported by the Russian Science Foundation under Project No. 23-76-01011 “Development of a high-yield substrate using biochar ameliorants from thermally processed organic raw materials for growing microgreens and low-growth vegetable products”

(<https://rscf.ru/project/23-76-01011/>). The authors sincerely express their gratitude to the Research Resource Center “Rational Nature Management and Physico-Chemical Research” of the Tyumen State University for invaluable support in carrying out analytical studies.

Влияние высокопористых биоуглей на свойства тепличных торфяных субстратов

© 2025 г. А. А. Дрягина, К. О. Пономарев*, Т. А. Кремлева,
Е. И. Елина, Н. А. Шулаев, Л. М. Хайнак

*Тюменский государственный университет, Россия,
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6,*

** <https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: k.o.ponomarev@utmn.ru.*

*Поступила в редакцию 04.03.2025, после доработки 04.04.2025,
принята к публикации 13.11.2025*

Резюме: Торф является ключевым компонентом субстратов в тепличном хозяйстве, и улучшение его свойств за счет добавления органических компонентов является распространенной практикой. В этом исследовании сравниваются высокопористые биоугли из скорлупы кедровых орехов, полученные в условиях медленного пиролиза и при высокой температуре с последующей активацией, в качестве добавок, частично заменяющих торф в субстратах. Установлено содержание углерода и степень разложения органического вещества в торфяных смесях с биоуглями различных концентраций (10% и 20% об.) и форм (измельченная и неизмельченная). Установлено, что 20% измельченного биоугля приводят к наибольшему росту соотношения C/N, что обычно наблюдается в неосушенных или более глубоких слоях торфа, указывая на большую интенсивность гумификации, наилучшим образом стимулируя микробную активность, но свидетельствуя о возможном снижении доступности азота для растений. Определены концентрации макро- и микроэлементов в смесевых торфяных субстратах. Результаты показали, что внесение измельченного активированного биоугля (10–20% об.) в торф значительно увеличивает в субстрате концентрацию ключевых макроэлементов, таких как фосфор, калий и кальций в 4.9–5.9, 3.3–3.9, 1.7–1.8 раза соответственно, что свидетельствует о перспективности активированного биоугля для улучшения питательных свойств торфяных субстратов. Особое внимание уделено анализу влияния биоуглей на содержание тяжелых металлов и неметаллов, который подтвердил потенциальную эффективность и экологическую

безопасность их использования. Полученные данные свидетельствуют о возможности частичной замены торфа высокопористыми биоуглями, особенно в измельченной форме, что может способствовать повышению урожайности и устойчивости растений к стрессовым условиям.

Ключевые слова: активированный биоуголь; пористость; сорбционная способность; элементный состав субстрата; тяжелые металлы; экологическая безопасность.

The effect of highly porous biochar on the properties of greenhouse peat substrates

© 2025 A. A. Dryagina, K. O. Ponomarev*, T. A. Kremleva,
E. I. Elina, N. A. Shulaev, L. M. Khainak

University of Tyumen,

6 Volodarskogo Str., Tyumen 625003, Russian Federation,

**<https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>, e-mail: k.o.ponomarev@utmn.ru.*

Received 04.03.2025, Revised 04.04.2025, Accepted 13.11.2025

Abstract: Peat is a key component of substrates in greenhouse cultivation, and enhancing its properties through the addition of organic components is a common practice. This study compares highly porous biochars derived from pine nut shells, produced under slow pyrolysis and high-temperature conditions with subsequent activation, as additives partially replacing peat in substrates. The carbon content and degree of organic matter decomposition were determined in peat mixtures with biochars of different concentrations (10% and 20% by volume) and forms (ground and unground). It was found that 20% ground biochar leads to the greatest increase in the C/N ratio, typically observed in undrained or deeper peat layers, indicating a higher intensity of humification that optimally stimulates microbial activity, yet suggesting a possible reduction in nitrogen availability for plants. The concentrations of macro- and micronutrients in mixed peat substrates were determined. The results showed that the addition of ground activated biochar (10–20% by volume) significantly increases the concentration of key macronutrients in the substrate, such as phosphorus, potassium, and calcium by factors of 4.9–5.9, 3.3–3.9, and 1.7–1.8, respectively, demonstrating the promising potential of activated biochar for improving the nutrient properties of peat substrates. Particular attention was paid to analyzing the impact of biochars on the content of heavy metals and non-metals, confirming their potential effectiveness and environmental safety. The data obtained suggest the possibility of partially replacing peat with highly porous biochars,

especially in ground form, which may contribute to increased crop yields and enhanced plant resistance to stress conditions.

Keywords: activated biochar; porosity; sorption capacity; elemental composition of substrate; heavy metals; environmental safety.

ВВЕДЕНИЕ

Торфяники являются важнейшими поглотителями углерода в наземных экосистемах, занимая площадь более 3 млн км² северного полушария (Beaulne et al., 2021; Тимофеева и др., 2024). Направление добычи торфа, его использования и переработки постоянно развивается, регулярно рассматривается и поддерживается в различных регионах России, в том числе совместно с предприятиями, расположенными за ее пределами (В Тюмени..., 2024; Яконовская, 2024). Торф является одним из традиционно используемых субстратов в сельскохозяйственных и городских теплицах для выращивания растений. Но в то же время он является невозобновляемым ресурсом из-за очень длительного времени его регенерации и трудозатратным видом сырья с точки зрения его добычи и транспортировки (требуется содержать штат сотрудников, производственную инфраструктуру, большой комплекс технологических и тяговых машин и оборудования) (Яконовская, 2024). Поэтому в последние годы ведется поиск экологической и экономической альтернативы путем проведения исследований, направленных на разработку высококачественных и недорогих субстратов, и, соответственно, поиск добавок к ним для снижения потребления торфа. Физико-химические свойства среды выращивания на основе торфа можно улучшить, добавив такие компоненты, как перлит, но он является дорогостоящим материалом, характеризуется низкой экологической устойчивостью и положительным электрическим зарядом, поэтому не вступает в соединения с внесенными удобрениями (Zulfıqar et al., 2019). Решением этой проблемы может стать использование органических добавок в составе торфяных субстратов. Но прямое их использование может привести к внесению патогенов или повышению концентрации тяжелых металлов, что негативно скажется на качестве урожая (Zulfıqar et al., 2019). Целесообразнее термически преобразовывать органический материал в твердый углеродистый продукт – биоуголь.

Биоуголь – это углеродистый материал, образующийся путем термического разложения биомассы в условиях отсутствия кислорода при температурах от 300 до 1000 °C (Kabir et al., 2023). Вследствие термохимического преобразования биомассы получаемый продукт не содержит вредителей, патогенов и семян сорняков (Zhang et al., 2023). Кроме того, в процессе разложения биомассы происходит удаление многих летучих веществ, способствуя образованию высокоуглеродистой структуры и, как следствие, достижению высокого показателя степени разложения органического вещества (C/N) (Холодов и др., 2020; Пономарев и др., 2024). Также биоуголь, как и удобрение с медленным высвобождением, содержит в себе определенные концентрации различных макро- и микроэлементов. Таким образом, биоуголь не просто снижает потребность в удобрениях, но и может существенно изменить органическую и минеральную составляющие торфа. Биоуголь уже привлек широкое внимание как средство улучшения почвы, повышения урожайности растений и снижения вымывания питательных веществ (Biederman, Harpole, 2013; Singh Yadav et al., 2023). Однако исследований, посвященных замене части торфа биоуглем, проведено недостаточно.

Так, например, известно, что биомасса растений может быть больше, если выращивать растения в торфяном субстрате с биоуглем по сравнению с торфяной средой без добавок (Méndez et al., 2015). При этом с ростом температуры переработки сырья вносимый биоуголь обеспечивает более высокий прирост растительной биомассы (Nieto et al., 2016). В других работах внесение биоугля в торф не оказало влияния на массу растений, но увеличило их высоту (Vaughn et al., 2013). Эти результаты сопровождалась регистрацией снижения кислотности и роста электропроводности, насыпной плотности субстрата, его общей пористости и вододерживающей способности (Vaughn et al., 2013; Margenot et al., 2018; Zhang et al., 2023), что, как отмечается в работе (Chrysargris et al., 2020), полезно при использовании кислых сред выращивания, к которым и относится торф. Показано (Lévesque et al., 2020), что при выращивании томатов и сладкого перца добавка к торфу на основе биоугля подходит лучше, чем перлит. Другие исследования показали, что биоуголь может заменить часть торфа в теп-

личном производстве без каких-либо отрицательных последствий для роста и урожайности мяты, базилика, томатов и бархатцев (Margenot et al., 2018; Huang et al., 2019; Yan et al., 2020). Однако, как отмечают авторы (Chrysargris et al., 2020), каждый вид растений требует специальной оценки, так как результаты могут быть не общими.

Внесение биоугля в торф благоприятно сказывается на разнообразии бактерий в ризосфере выращиваемых растений (De Tender et al., 2016). А, согласно предположениям (Chrysargris et al., 2020), ускоренный метаболизм почвенной биоты приводит к изменениям органической и минеральной частей торфа. Более того, обработка биоугля физическими (например, паровая активация) или химическими (смешивание с удобрениями или пропитка питательным раствором) методами может способствовать высоким показателям содержания макроэлементов (N, P, K) в субстрате (Chrysargris et al., 2020; Osman et al., 2022). Авторы (Lévesque et al., 2020) утверждают, что применение биоугля может позволить сократить внесение удобрений без снижения урожайности плодов, однако необходимы дальнейшие исследования, чтобы определить, как биоуголь влияет на свойства торфа, так как индивидуальное использование биоугля в качестве среды для выращивания или высокие дозы его внесения (>80% об.) не показывают положительного результата, подавляя рост растений (Méndez et al., 2015; Nieto et al., 2016; Huang et al., 2019; Yan et al., 2020).

Рассмотренные выше исследования направлены преимущественно на оценку массы выращиваемых растений и частично на физические свойства торфа (плотность, пористость и др.). Актуальность и значимость применения такой добавки видятся оправданными. При этом оценка изменения органической и минеральной частей торфа при внесении в него биоугля остается малоизученной областью и требует рассмотрения. Целью работы являлось установление влияния биоугля на содержание углерода в торфяном субстрате, степень разложения органического вещества и минеральный состав (Ca, K, P, Mg и др.) субстрата. Особое внимание уделено анализу изменений содержания основных питательных элементов, тяжелых металлов и неметаллов в торфяном субстрате при частичной замене его биоуглем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве основы субстратов рассмотрен широко распространенный в Западной Сибири сфагновый верховой торф ($pH_{KCl} = 4.66$; $C = 47.5\%$, $N = 1.2\%$), который в природе подвержен осушению и деградации, что вызывает экологические проблемы, а в сельском хозяйстве является недостаточно продуктивным из-за низкой концентрации макро- и микроэлементов (De Melo et al., 2014; Спирина и др., 2014). С целью изменения свойств торфа к нему добавлялись биоугли из скорлупы кедровых орехов – местного для Сибири вторичного сырья. Кедровый орех находится в списке стратегически важных товаров и ресурсов в России. Большие объемы производства кондитерских товаров из него и высокие экспортные пошлины на неочищенные кедровые орехи приводят к колоссальным объемам отходов в виде скорлупы кедровых орехов. Биоуголь из них получен методом пиролиза (рис. 1) (Пономарев и др., 2024).

Скорлупу кедровых орехов высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем ее помещали в реактор 1 и закрывали фланцевые соединения. В течение 5 минут реактор продували инертным газом (азотом) 2 с целью удаления кислорода. Нагрев реактора осуществлялся с использованием автотрансформатора 3. Через 1 час температура в реакторе достигала $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выходила на квазистационарный режим. Контроль температуры проводили с помощью термопары ТЭЦ-57 (тип К), подключенной к регистратору температуры ТМ 5104 4. Через 0.5 часа изотермической выдержки автотрансформатор выключался и реактор остывал до комнатной температуры. Твердый продукт пиролиза (биоуголь) извлекали из реактора и хранили в герметичной таре. Свойства полученного биоугля (Б) и влияние его на органическую и минеральную части сравнивались с активированным биоуглем (АБ) из скорлупы кедровых орехов, активация которого осуществлялась водяным паром с температурой $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исследуемые биоугли (Б и АБ) вносились в торф в концентрации 10% и 20% об. в неизмельченном и измельченном (изм) виде.

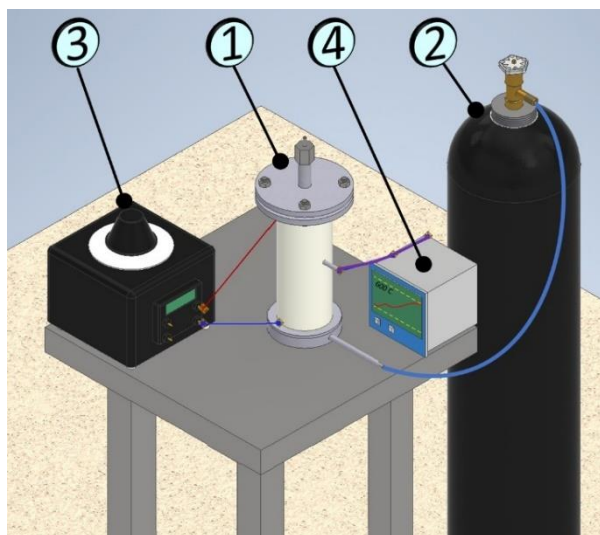


Рис. 1. Экспериментальная установка для получения биоугля: 1 – реактор; 2 – баллон с инертным газом; 3 – автотрансформатор ЛАТР; 4 – термометр многоканальный.

Fig. 1. Experimental setup for biochar production: 1 – reactor; 2 – inert gas cylinder; 3 – autotransformer LATR; 4 – multichannel thermometer.

Выбранные концентрации (10% и 20% об.) обоснованы известными данными о том, что биоугли (например, из кленовой коры и сосновой щепы или пшеничной соломы) могут заменить до 20% (об./об.) дорогого перлита в субстрате на основе торфа, увеличив биомассу и урожай выращиваемых в теплицах растений (Zulficar et al., 2019; Lévesque et al., 2020). При этом высокие концентрации мелиорантов могут принести вред, а не пользу растениям (Chrysargris et al., 2020). Измельчение биоуглей проводилось на мельнице VLM-25 (Вилитек, Россия) с получением частиц размером до 0.05 мм. Торфяные субстраты с биоуглем вносились в вегетационные сосуды объемом до 1 л с трехкратной повторностью по следующей схеме: Т – торф-контроль (торф без биоуглей); Т+Б10 – торф с концентрацией биоугля Б 10% об.; Т+Б20 – торф с концентрацией биоугля Б 20% об.; Т+Б10 (изм) – торф с концен-

трацией измельченного биоугля Б 10% об.; Т+Б20 (изм) – торф с концентрацией измельченного биоугля Б 20% об.; Т+АБ10 – торф с концентрацией биоугля АБ 10% об.; Т+АБ20 – торф с концентрацией биоугля АБ 20% об.; Т+АБ10 (изм) – торф с концентрацией измельченного биоугля АБ 10% об.; Т+АБ20 (изм) – торф с концентрацией измельченного биоугля АБ 20% об. После этого в течение 1 месяца в субстратах выращивалась микрозелень (рукола) в количестве 12 семян на вегетационный сосуд. После завершения вегетационного опыта надземная и подземная части руколы удалены с целью пробоподготовки исследуемых образцов (Т, Т+Б10, Т+Б20, Т+Б10 (изм), Т+Б20 (изм), Т+АБ10, Т+АБ20, Т+АБ10 (изм), Т+АБ20 (изм)) для определения в торфяных субстратах концентрации макро- и микроэлементов.

Удельная площадь поверхности биоуглей измерялась методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) с использованием адсорбционного анализатора удельной поверхности и пористости 3P sync 210 (Ribori Instrumentation, Германия). Образцы высушивались при 125 °С в течение 12 ч. Затем осуществлялась дегазация образцов в вакууме в течение 12 часов при температуре 300 °С. Площадь поверхности образцов определялась при температуре –196 °С.

Распределение основных питательных элементов (азот, фосфор и калий) на поверхности биоуглей определено на растровом электронном микроскопе Tescan Mira 3 с использованием EDS приставки Oxford instruments X-Max при ускоряющем напряжении 5 кВ. Построение карты проведено с помощью программы AZtec.

Углерод (С), как основной элемент органической части исследуемых образцов (биоуглей и торфяных субстратов с ними), азот (N), до 95% которого приходится на долю органических соединений (белков, аминокислот и др.), и соотношение С/N, как важный показатель, характеризующий степень разложения органического вещества, определены методом сухого каталитического сжигания в токе кислорода на автоматическом анализаторе Vario MicroCube (Elementar, Германия). Перед каждым измерением работоспособность прибора проверяли на стандартном образце сульфаниламида (Табакеев и др., 2024).

Содержание минеральных компонентов (Ca, Mg, Na и др.) биоуглей и субстратов определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии с применением спектрофотометра PlasmaQuant PQ 9000 (Analytik Jena, Германия) (Василевич, 2018; Vasilevich et al., 2023). Определение элементов проводилось в пламени аргон-воздух, что позволило достичь высокой чувствительности и точности измерений (Беляцкий, 2015). Контроль точности измерений выполнен методом “введено-найдено” и методом стандартного образца, что позволило оценить точность экстракции и стабильность отклика прибора (Моисеева и Потапова, 2019). В качестве экстрагента использовалась азотная кислота (HNO_3) в комбинации с бидистиллированной водой, что обеспечивает эффективное растворение целевого спектра элементов без риска потерь летучих соединений. Экстракция кислоторастворимых форм элементов из торфа, биоуглей и субстратов проводилась из отдельных навесок в двухкратной повторности. Результатом измерения считалось среднее арифметическое значение измерений при расхождении величин менее 5% (Московченко, Романенко, 2020).

В отличие от валового содержания, включающего все элементы, независимо от их доступности, кислоторастворимые формы предоставляют информацию о потенциально мобилизуемых элементах, способных участвовать в биогеохимических процессах, особенно в кислых средах (Arbuzov et al., 2018; Василевич, 2018; Vasilevich et al., 2023). Для получения кислоторастворимых форм навеска воздушно-сухой пробы массой 2.00 г, взвешенная на аналитических весах с точностью до 0.01 г, помещалась в коническую колбу вместимостью 50 см^3 , в которую приливалось 10 см^3 5 моль/ дм^3 кислоты HNO_3 , закрывалась и ставилась на перемешивающее устройство Loip LS-110 (LOIP, Россия). В течение трех часов со скоростью 125 оборотов и при температуре 80 °C осуществлялось вращение образцов. После охлаждения и перемешивания вытяжка переносилась на фильтр. Фильтрование проводилось через складчатый фильтр “Синяя лента” в мерных колбах объемом 50 см^3 . Конические колбы и осадки на фильтре два раза промывались дистиллированной водой. Раствор доводился до метки и перемешивался. Подготовленные для анализа образцы переливались в пробирки.

Массовая доля элементов в образцах и среднее значение двух результатов измерений массовой доли элементов определялись по М-МВИ-80-2008. Для корректной верификации результатов исследований придерживались процедуры нормативных документов ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 и РД 52.18.191-2018. Руководство требованиями таких документов при проведения количественно-химического анализа отдельных форм элементов в образцах принято считать оправданным (Василевич, 2018).

Статистическая обработка данных включала вычисление средних значений, указанных на графиках, и абсолютной погрешности (Тимофеева и др., 2024). Достоверность различий оценивали методом дисперсионного анализа (ANOVA). Значимость различий между средними значениями анализировалась с использованием критерия Тьюки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Текстурные характеристики высокопористых биоуглей

Морфология и текстурные характеристики высокопористых биоуглей являются значительными факторами, определяющими их свойства и потенциальное применение. На рисунке 2 приведены снимки поверхности биоуглей *Б* и *АБ*, позволяющие судить о морфологии и распределении основных минеральных компонентов.

С использованием сканирующего электронного микроскопа рассмотрены и выявлены морфологические особенности биоуглей, полученных при температурах 600 °С (рис. 2а) и 850–1000 °С (рис. 2б) из скорлупы кедрового ореха. Видно, что биоугли характеризуются высокой пористостью, что связано с интенсивным выделением летучих соединений при термической обработке сырья. Изображение (рис. 2а) показывает ячеистую гексагональную структуру не активированного биоугля с относительно гладкими поверхностями, так как при температуре 600 °С органические компоненты, присутствующие в биоугле разлагались, сохраняя стенки клеток относительно целыми (Tammeorg et al., 2013).

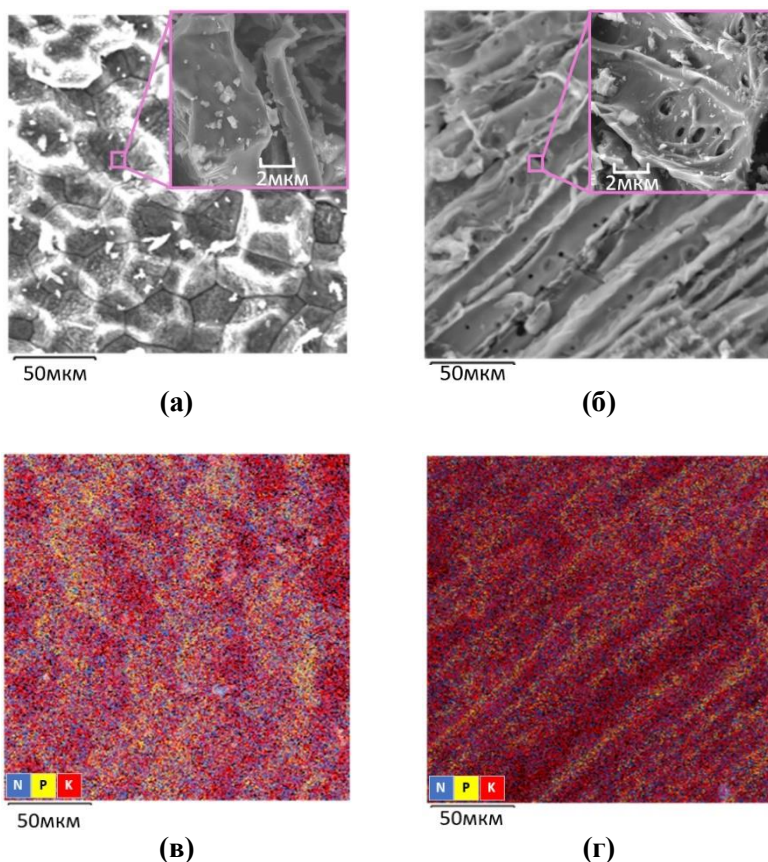


Рис. 2. Электронное изображение структуры поверхности не активированного (а) и активированного (б) биоугля из скорлупы кедрового ореха, а также многослойное изображение распределения основных питательных элементов (азот (N), фосфор (P), калий (K)) в не активированном (в) и активированном (г) биоугле.

Fig. 2. An electronic image of the surface structure of unactivated (a) and activated (б) biochar from pine nut shell, and a multilayer image of the distribution of major nutrients (nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K)) in unactivated (в) and activated (г) biochar.

Более высокие температуры и активация паром привели к большему разложению органических веществ, увеличивая пористость и разрушая структуры стенок, что подтверждает образование большого количества пор размером менее 2 мкм (рис. 2б). Интенсивное воздействие пара привело к агрессивному разрушению стенок, образуя сетчатую структуру и систему разветвленных пор, увеличивая тем самым площадь поверхности. Такие особенности строения структуры высокопористых биоуглей указывают на их высокую сорбционную способность (Микова и др., 2024).

Рисунок 2 (в, г) показывает распределение основных минеральных элементов (N, P, K) по поверхности биоуглей. На изображении (рис. 2в) можно увидеть, что данные элементы распределены относительно равномерно, но с некоторой неоднородностью по всей поверхности. В активированном биоугле (рис. 2г) распределение элементов заметно отличается, с преобладанием калия (K) и фосфора (P), но уменьшением азота (N). Это указывает на то, что в процессе активации часть минеральных элементов была перераспределена.

С целью более детального анализа рассмотрены текстурные характеристики биоуглей *Б* и *АБ* в сравнении с характеристиками торфа *Т* (табл. 1).

Таблица 1. Текстурные характеристики образцов торфа и двух биоуглей, использованных в эксперименте

Table 1. Textural characteristics of peat and two biochar samples used in the experiment

Образцы	$S_{\text{ВЕТ}}$, м ² /г	V_p , см ³ /г	D_p , нм
Торф	3.3	0.014	16.6
Биоуголь	195.9	0.149	3.1
Активированный биоуголь	826.1	0.555	2.7

Примечание. $S_{\text{ВЕТ}}$ – удельная площадь поверхности торфа и биоуглей; V_p – размер пор рассматриваемых образцов; D_p – диаметр пор.

Note. $S_{\text{ВЕТ}}$ specific surface area of peat and biochar; V_p – pore size of the samples; D_p – pore diameter.

Рост температуры или активация являются доминирующими факторами увеличения пористости и удельной площади поверхности биоугля (Chai et al., 2024; Handiso et al., 2024). Площадь поверхности является ключевым фактором, определяющим сорбционную способность материалов (Handiso et al., 2024). Данные, приведенные в таблице 1, подтверждают тот факт, что в зависимости от условий получения биоугля площадь поверхности биоуглей может существенно отличаться (Bu et al., 2022; Wang et al., 2022). Активированный биоуголь (*АБ*) имеет высокую площадь поверхности $S_{\text{ВЕТ}} = 826.1 \text{ м}^2/\text{г}$ при температуре активации 1000°C . Биоуголь *Б* также имеет значительную площадь поверхности, но ниже, чем у *АБ* ($S_{\text{ВЕТ}} = 195.9 \text{ м}^2/\text{г}$). Такой результат свидетельствует о высокой пористости и потенциальной сорбционной способности биоуглей, что в свою очередь помогает им сохранять в себе воду и питательные вещества (Chai et al., 2024; Handiso et al. 2024). Объем пор исследуемых биоуглей и их средний диаметр находится в диапазонах $V_p = 0.555\text{--}0.149 \text{ см}^3/\text{г}$ и $D_p = 2.689\text{--}3.050 \text{ нм}$ соответственно. В торфе же размер пор более чем в 5 раз выше, чем в исследуемых биоуглях, а объем пор составляет $0.014 \text{ см}^3/\text{г}$, что способствует низкой сорбции питательных веществ.

Элементный состав торфа и исследуемых биоуглей

На рисунке 3 представлена массовая концентрация серы (*S*), водорода (*H*), азота (*N*), кислорода (*O*) и углерода (*C*) в верховом торфе (*T*), биоугле из скорлупы кедрового ореха (*Б*) и активированном биоугле (*АБ*).

Результаты элементного анализа показали (рис. 3), что в торфе содержится больше серы, водорода, азота, кислорода и значительно меньше углерода по сравнению с биоуглями, так как торф – неразложившийся органический материал, а биоугли – продукты пиролиза, в процессе которого удалялись летучие соединения, увеличивая долю углерода в составе исследуемых образцов.

Оценка содержания в торфе и образцах биоуглей питательных элементов (калий, азот, фосфор), микроэлементов и тяжелых металлов, позволяет судить о перспективах их использования для выращивания растений. На рисунке 4 приведены результаты

определения кислоторастворимых форм различных элементов в торфе (концентрации Cd и Co не указаны, они ниже предела обнаружения: < 0.01 мг/кг и < 0.02 мг/кг соответственно).

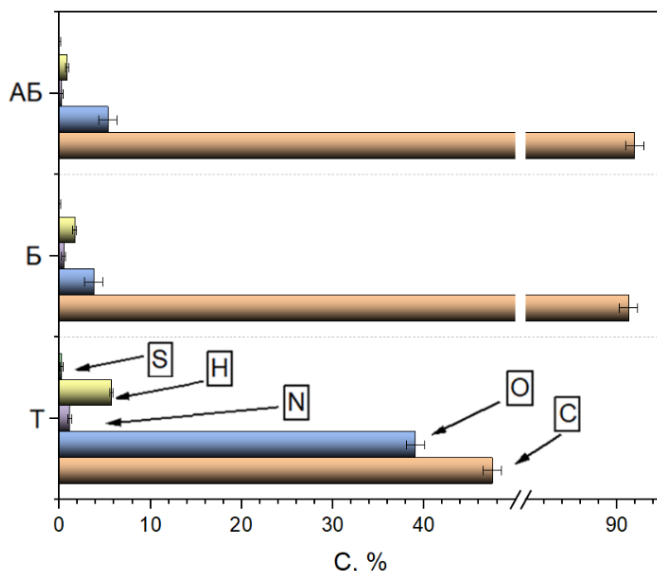
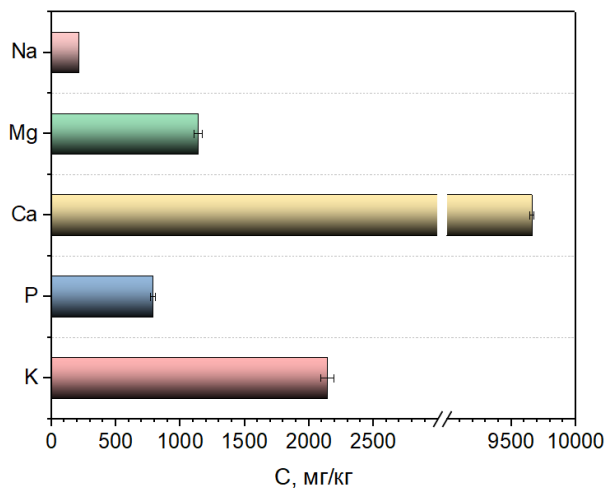


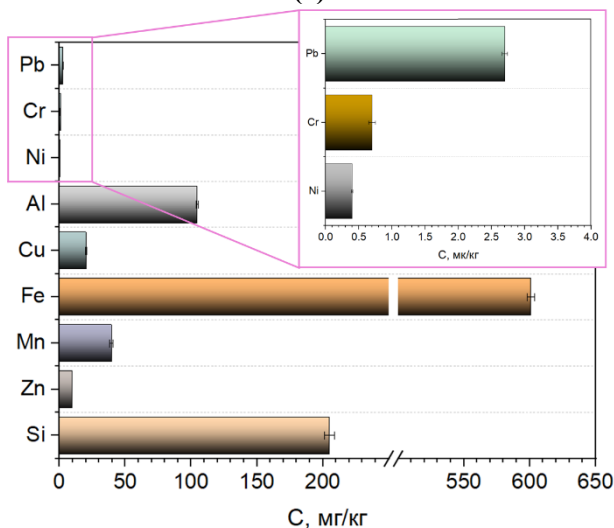
Рис. 3. Элементный состав (S, H, N, O, C) торфа (Т), биоугля из скорлупы кедрового ореха (В) и активированного биоугля из скорлупы кедрового ореха (АВ).

Fig. 3. Elemental composition (S, H, N, O, C) of peat (T), pine nut shell biochar (B) and activated pine nut shell biochar (AB).

Верховой торф формируется в условиях высокой влажности при недостатке кислорода, что в свою очередь влияет на концентрацию элементов в его составе (Карпенко, 2009). Агрономическая ценность торфа зависит от состава его неорганической части и содержания элементов. Ключевую роль в формировании свойств торфа и его потенциала как субстрата играют макроэлементы: К, Р, Са, Mg, которые определяют питательную ценность торфа (Тишкович, 1983; Степанова, Покровский, 2011).



(a)



(b)

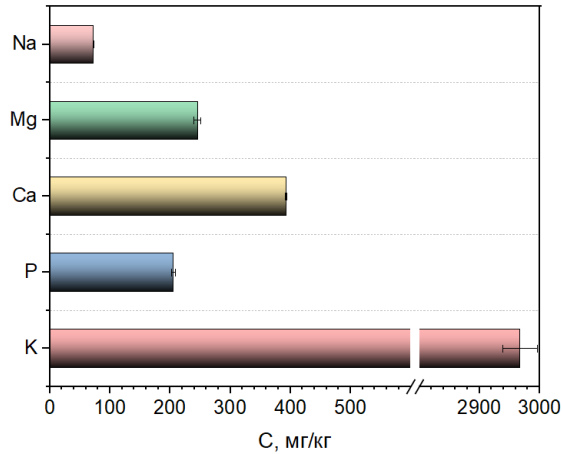
Рис. 4. Содержание кислоторастворимых форм макроэлементов (a) и микроэлементов (б) в верховом торфе.

Fig. 4. Content of acid-soluble forms of macroelements (a) and microelements (b) in high moor peat.

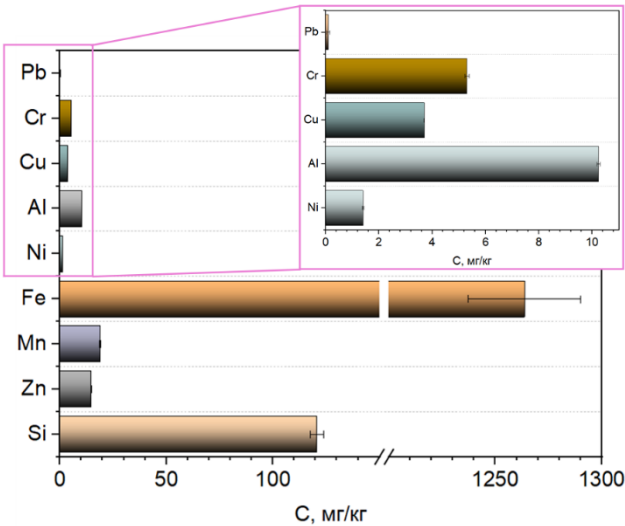
Концентрация кислоторастворимых форм калия (K) в составе торфа составляет 2.14 г/кг, что в свою очередь способствует повышению плодородия среды выращивания и увеличению урожайности культур. Содержание фосфора (P) достигает 789 мг/кг и благоприятно влияет на развитие растений (Акимова, 2023). Видно (рис. 4а), что кальций (Ca) обладает более высокой концентрацией (9.66 г/кг) по сравнению с остальными элементами. Содержание данного макроэлемента в верховом торфе связано с его биогенной аккумуляцией (Степанова, Покровский, 2011). Кальций является одним из наиболее стабильных элементов в типичном верховом торфе и необходим для роста и развития растений, участвуя в формировании клеточных стенок и регулировании различных физиологических процессов (Швартау и др., 2014). Высокое содержание Ca в торфе объясняется его распространенностью в природе, в водоемах, в составе растительности (Яковлев и др., 2020). Содержание кальция в торфе играет роль регулятора процесса распада органического вещества в торфогенном слое, нейтрализуя кислотность и интенсифицируя микробиологическую деятельность (Тишкович, 1983). Содержание магния (Mg) составило 1.14 г/кг, что в 5.5 раза выше концентраций кремния (Si) и натрия (Na). Концентрация железа (Fe) не превышала 600 мг/кг, алюминия (Al) – 105 мг/кг, а остальных элементов – 20 мг/кг (рис. 4б). Можно заметить, что концентрации тяжелых металлов (Ni, Cr, Co, Cd, Pb) незначительны, что говорит о безопасном использовании торфа в качестве субстрата.

На рисунке 5 представлено содержание макро- и микроэлементов в исследуемых биоуглях из скорлупы кедрового ореха (концентрации Cd и Co не указаны, они ниже предела обнаружения: < 0.01 мг/кг и < 0.02 мг/кг соответственно).

В результате анализа установлено, что при сравнении двух различных биоуглей, полученных при 600 °C и при 850–1000 °C с активацией паром, содержание элементов выше в АБ (рис. 5). Процесс активации биоугля паром приводит к значительным изменениям в макро- и микроэлементном составе. Существенный рост доли калия (K) указывает на перспективу применения биоуглей в качестве альтернативных добавок к торфяному субстрату.



(a)



(б)

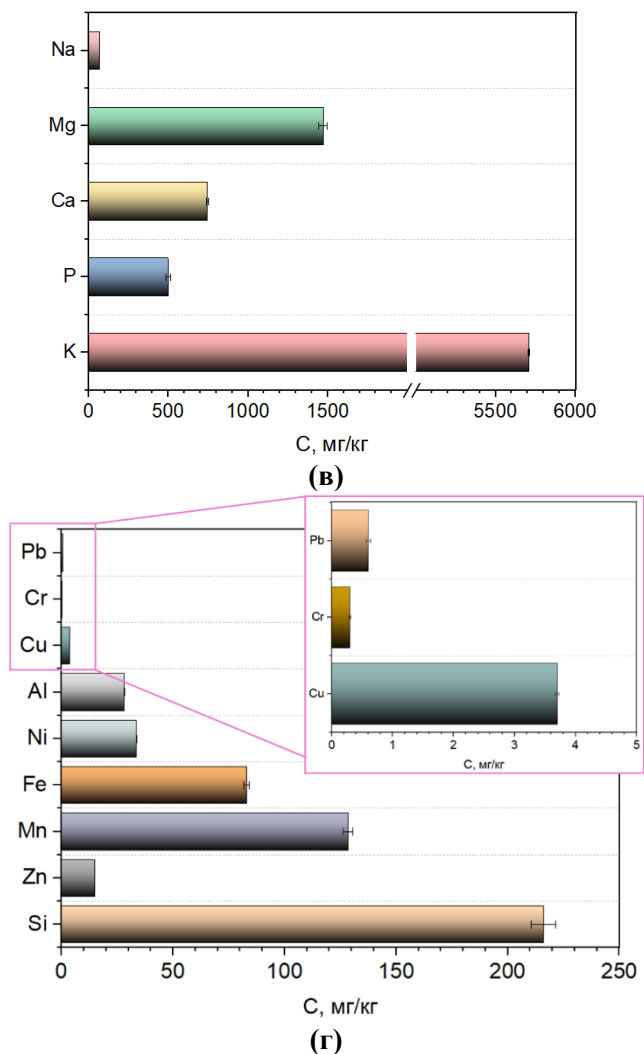


Рис. 5. Содержание кислоторастворимых форм макроэлементов (**а, в**) и микроэлементов (**б, г**) в биоугле (**а, б**) и активированном биоугле (**в, г**).

Fig. 5. Content of acid-soluble forms of macroelements (**a, v**) and microelements (**b, g**) in biochar (**a, b**), and in activated biochar (**v, g**).

Его концентрация в *Б* почти в 2 раза меньше, чем в *АБ*. Это связано с высвобождением элементов из структуры углеродистого остатка при его активации (Qian et al., 2019). Помимо калия в *АБ* можно выделить высокую концентрацию кислоторастворимых форм других зольных элементов, таких как фосфор (P) и кальций (Ca), концентрация которых увеличилась в 2.4 и 1.9 раза, соответственно, а концентрация магния (Mg) в активированном биоугле выросла в 6 раз и составила 1.47 г/кг (рис. 5в).

Однако можно заметить (рис. 5г), что после активации биоугля концентрация железа (Fe) существенно снижается в 15.2 раза, что может быть связано с его удалением вместе с жидкими продуктами пиролиза в виде соединений, таких, например, как $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Wang et al., 2019). Содержащиеся в биоугле макро- и микроэлементы (железо, кальций, магний) способствуют десульфуризации – связыванию соединений серы в малодоступные соединения (Ahmed et al., 2024). Содержание натрия (Na) снизилось в 1.1 раза, а концентрации кремния (Si), марганца (Mn), никеля (Ni) и алюминия (Al), наоборот, увеличились в 1.8, 6.7, 24 и в 2.7 раза соответственно. На содержание элементов цинк (Zn) и медь (Cu) активация паром в биоугле практически не повлияла.

Важным достоинством образцов исследуемых биоуглей (*Б* и *АБ*) является низкое содержание в них тяжелых металлов (Pb, Cd, Co, Cr и Cu) (рис. 5), что указывает на относительно чистое от загрязняющих веществ исходное сырье (скорлупа кедрового ореха) и продукт, получаемый из него. Это подтверждает факт экологически безопасного применения биоуглей в качестве добавок, частично заменяющих торф в субстратах для выращивания растений (Méndez et al., 2015; Nieto et al., 2016).

Содержание органических компонентов и кислоторастворимых форм макро- и микроэлементов в торфяных субстратах

Полученные в работе данные по элементному составу биоуглей позволяют считать их хорошей добавкой к питательной среде на основе торфа для выращивания растений. Поэтому далее проведен анализ изменения органической и минеральной частей торфяных субстратов с биоуглями *Б* и *АБ*.

На рисунке 6 представлены концентрация углерода и отношение C/N в субстратах.

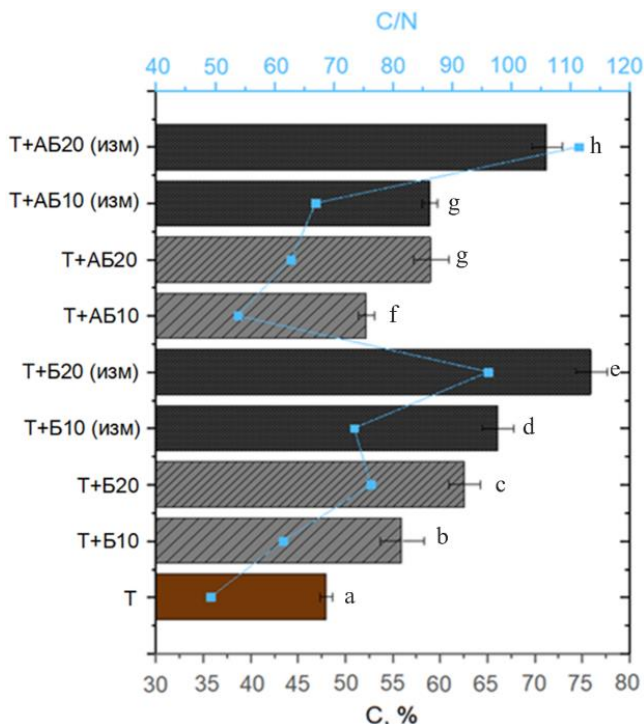


Рис. 6. Концентрация углерода и отношение C/N в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10* / *T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

Fig. 6. Carbon concentration and C/N ratio in substrates: *T* – top peat; *T+B10* / *T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

В контрольном образце (торфе) без добавок содержание углерода составляло около 48%. Добавление разного вида биоугля во всех вариантах привело к увеличению концентрации углерода (C) до 52–76%, что является очевидным, исходя из высокого содержания углерода в рассматриваемых биоуглях (рис. 6). Наибольшее увеличение концентрации углерода наблюдается в вариантах с внесенным измельченным биоуглем большей концентрации (20% об.).

Добавление биоугля во всех вариантах привело к увеличению C/N, что обусловлено высоким содержанием углерода в биоугле и снижением азота. В контрольном образце соотношение C/N составляло 49.3, что характерно для данного органического субстрата и свидетельствует о его низкой биохимической активности с замедленным разложением (из-за недостатка азота) (Карпенко, 2009). При увеличении концентрации биоугля в субстрате соотношение C/N увеличивается, что снижает доступность азота и может замедлить разложение органического вещества. Высокие значения C/N (>100) в вариантах с 20% биоугля могут указывать на потенциальный азотный дефицит, требующий дополнительного внесения азотных удобрений. В связи с этим, можно сделать вывод, что высокие концентрации биоугля могут способствовать устойчивости к микробному разложению, но и возможному снижению доступности азота для растений.

Для более подробного анализа и экологической оценки биоуглей в качестве применяемой добавки в торфяной субстрат, необходимо рассмотреть их влияния на макро- и микроэлементный состав приготовленной смеси. На рисунке 7 представлены результаты определения концентраций наиболее важных макроэлементов (K, P) в верховом торфе и торфяных субстратах с внесенными в разных концентрациях (10 и 20 % об.) и виде (не измельченном и измельченном (изм)) биоуглями, полученными медленным пиролизом при 600°C (Б) и при пиролизе с активацией паром до 1000°C (АБ).

Установлено (рис. 7), что внесение биоугля достоверно увеличивает концентрацию калия в торфяном субстрате (за исключением варианта T+B20) более чем в 2 раза. При этом добавление активированного биоугля (АБ) привело к большему увеличению K

(в 4–4.9 раза) по сравнению с добавлением обычного биоугля (*Б*)
(в 2.1–3.9 раза).

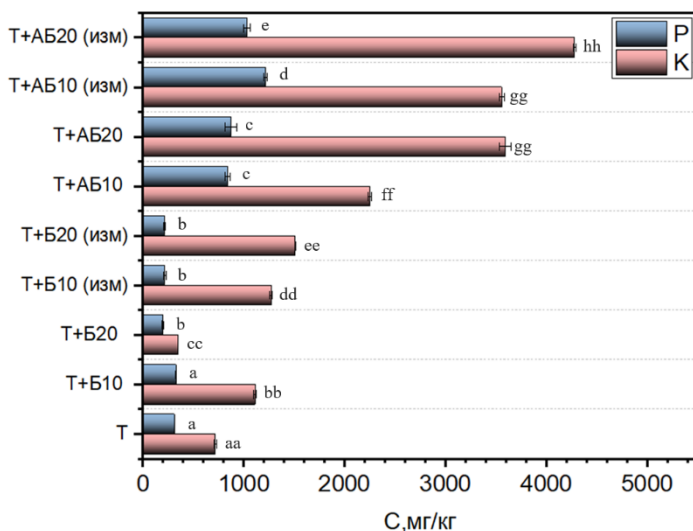


Рис. 7. Концентрация калия и фосфора в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10* / *T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

Fig. 7. Potassium and phosphorus concentrations in substrates: *T* – top peat; *T+B10* / *T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Внесение *Б* в торфяной субстрат снизило концентрацию фосфора (P) примерно в 1.5–1.6 раза (за исключением варианта *T+B10*). При добавлении *AB* в торф можно наблюдать увеличение P в 1.6–2.8 раза. Это объясняется высокой концентрацией основных питательных элементов (K, P) в *AB* (примерно в 1.9–2.4 раза

выше по сравнению с *Б*). Можно заметить, что в образцах субстратов с измельченной активированной добавкой концентрация элементов выше, что, скорее всего, связано с более равномерным, приводящим к гомогенизированному состоянию, распределением биоугля по объему субстрата.

На рисунке 8 приведены результаты определения концентрации Са и Mg в исследуемых субстратах.

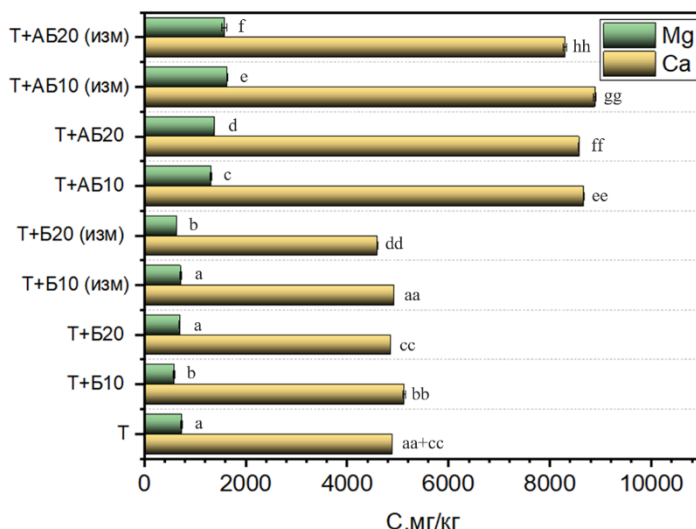


Рис. 8. Концентрация кальция и магния в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10* / *T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

Fig. 8. Calcium and magnesium concentrations in substrates: *T* – top peat; *T+B10* / *T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Видно (рис. 8), что добавление в субстрат активированного биоугля привело к значительным изменениям элементного состава смеси. Например, у образцов торфа с активированным биоуглем (10 и 20% об.) наблюдается увеличение концентрации кальция (Ca) и магния (Mg) в 1.7–1.8 раза и 1.03–1.2 раза соответственно, по сравнению с контролем (*T*). Стоит отметить, что ионы кальция способны конкурировать с тяжелыми металлами в почвенных процессах и ингибировать их негативное воздействие (Кабата-Пендиас и Пендиас, 1989; Lima et al., 2024). Высокое содержание кальция в приготовленном субстрате указывает на большие перспективы добавки в виде измельченного *АБ*, по сравнению с *Б*.

На рисунке 9 представлена концентрация Fe, Na и Si в исследуемых субстратах.

Концентрация железа (Fe) при добавлении в торф биоугля 10% об. увеличилась в 1.4–1.7 раза (рис. 9). Увеличение дозы внесения добавки повлияло по-разному, в зависимости от вида биоугля: измельченная добавка увеличила концентрацию Fe в 1.5 раза, а не измельченная не привела к достоверному изменению концентрации элемента. При добавлении в торф активированного биоугля установлено увеличение концентрации железа и кремния в 1.5–2.2 раза, особенно при внесении не высокой дозы и в измельченном виде. Концентрация натрия (Na) достоверно снижалась при внесении в торф *Б* и *АБ* любого вида (измельченного и неизмельченного), причем наибольшее снижение (до 1.4 раза) наблюдалось при использовании большей концентрации биоуглей.

Концентрация Al, Cu, Mn и Zn в исследуемых субстратах приведена на рисунке 10.

При добавлении в торф *Б* установлено уменьшение концентрации меди (Cu) в 1.1–1.2 раза (за исключением варианта *T+Б10*, в котором зарегистрирован рост Cu в 1.4 раза). Для торфа с *АБ* наблюдался обратный эффект, зарегистрирован рост концентрации меди до 1.8 раза (за исключением варианта *T+АБ20 (изм)*, в котором концентрация Cu уменьшилась в 1.2 раза). Возможно, при добавлении *Б* ионы меди из-за высокой пористости биоугля связывались с функциональными группами на поверхности углеродного остатка (Liu et al., 2021), а в случае с *АБ* – рост количества карбоксильных и фенольных групп на поверхности биоугля при-

вел к мобилизации Cu (Томина и др., 2023).

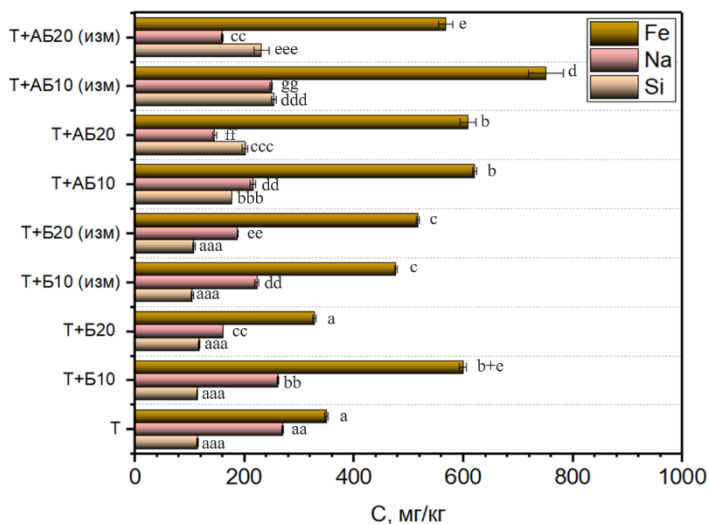


Рис. 9. Концентрация железа, натрия и кремния в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10* / *T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

Fig. 9. Iron, sodium, and silicon concentrations in substrates: *T* – top peat; *T+B10* / *T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Концентрация алюминия (Al) снижалась в 1.1–1.3 раза при внесении *Б* и в 1.4–1.5 раза – при внесении *АБ* (за исключением варианта *T+B10*, в котором концентрация Al увеличилась в 1.4 раза). Концентрации цинка (Zn) и марганца (Mn) значительно увеличились в 4.9–11.4 раза и в 3–5 раз соответственно при внесении *АБ*, по сравнению с *Б*, внесение которого практически не повлияло

на Zn и Mn.

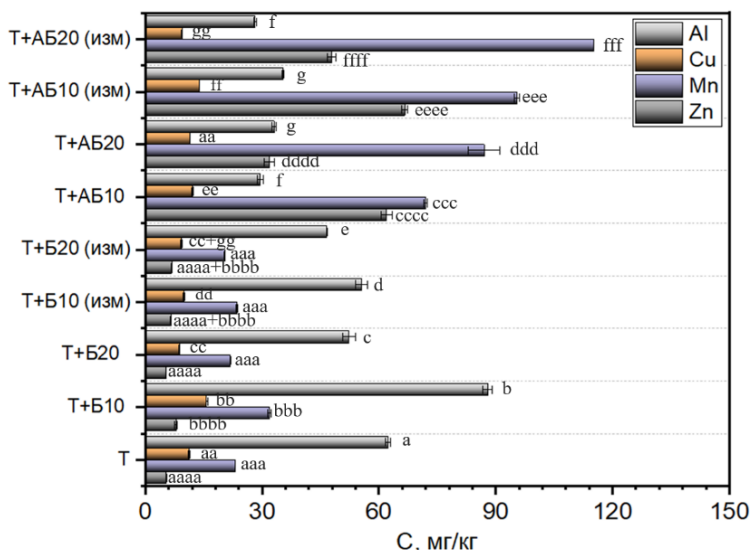


Рис. 10. Концентрация алюминия, меди, марганца и цинка в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10* / *T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

Fig. 10. Aluminium, copper, manganese, and zinc concentrations in substrates: *T* – top peat; *T+B10* / *T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Цинк и марганец регулируют синтез белков и ферментов, которые защищают растения от различных стрессовых факторов окружающей среды (Stanton et al., 2022). Следовательно, обеспечение достаточного количества содержания данных микроэлементов способствует повышению внутренней способности растений

выдерживать стрессовые условия и восстанавливаться после них (Stanton et al., 2022; Ahmed et al., 2024). Наибольшая концентрация Zn и Mn зарегистрирована при внесении измельченного активированного биоугля в торф – 66.7 мг/кг и 115.2 мг/кг соответственно.

Концентрация Pb, Cr, Ni в исследуемых субстратах приведена на рисунке 11 (концентрации Cd и Co не указаны, они ниже предела обнаружения: <0.01 мг/кг и <0.02 мг/кг соответственно).

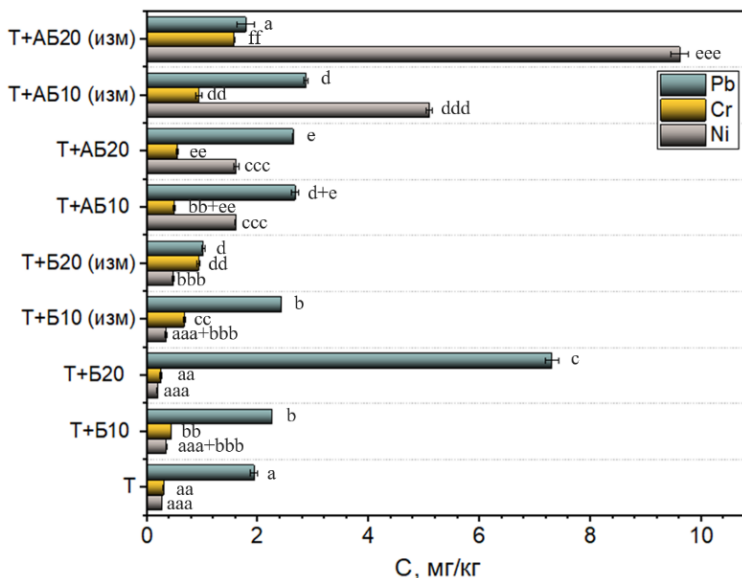


Рис. 11. Концентрация свинца, хрома и никеля в субстратах: *T* – верховой торф; *T+B10* / *T+B20* – торф с биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – торф с измельченным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – торф с активированным биоуглем концентрацией 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – торф с измельченным активированным биоуглем концентрацией 10%/20%.

Fig. 11. Lead, chromium, and nickel concentrations in substrates: *T* – top peat; *T+B10* / *T+B20* – peat with biochar concentration of 10%/20%; *T+B10 (изм)* / *T+B20 (изм)* – peat with crushed biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10* / *T+AB20* – peat with activated biochar concentration of 10%/20%; *T+AB10 (изм)* / *T+AB20 (изм)* – peat with crushed activated biochar concentration of 10%/20%.

Установлено, что при использовании активированного биоугля наблюдается существенное увеличение концентрации никеля (Ni) в 4.9–34.6 раза. Измельчение *АБ* приводило к увеличению концентрации элемента в 17.9–34.5 раза, скорее всего, из-за высокой площади контакта добавки с основной питательной среды (торфом). Измельчение и рост концентрации добавки также приводил к увеличению содержания хрома (Cr) до 5.4 раза. При добавлении в торф *Б* зарегистрировано увеличение концентрации свинца (Pb) в 1.1–3.8 раза (за исключением варианта *T+B20% (изм)*, в котором концентрация Pb уменьшилась в 1.5 раза). Аналогичный результат получен и с активированным биоуглем – рост концентрации элемента в 1.4–1.5 раза, за исключением варианта с высокой дозой внесения измельченной добавки. Это объясняется тем, что измельченная форма сильнее сорбирует элементы, снижая их подвижность.

Таким образом, внесение биоугля и активированного биоугля в торф оказывает значительное влияние на распределение тяжелых металлов и для целенаправленного регулирования содержания этих элементов в торфе требуется оптимизация дозировки и формы биоугля в зависимости от конкретных задач на производстве. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при выращивании растений в торфе, часть его может быть заменена биоуглем и лучшим вариантом будет являться внесение высокопористых активированных биоуглей в измельченном виде малой концентрацией (10% об.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесение биоугля в торфяной субстрат оказывает комплексное влияние на органическую и минеральную части сфагнового верхового торфа. Установлено, что применение биоугля, особенно активированного и измельченного, приводит к увеличению содержания углерода в субстрате, что может способствовать его устойчивости к микробному разложению и улучшению агрофизических свойств. Однако увеличение соотношения C/N при внесении высоких доз биоугля указывает на возможное снижение доступности азота для растений. Это явление может привести к временному дефициту азота, что требует корректировки системы

удобрений (например, внесения дополнительного азота или применения биоугля, предварительно насыщенного питательными элементами).

Анализ кислоторастворимых форм макро- и микроэлементов показал значительное увеличение содержания калия, фосфора, кальция, магния, железа и кремния, а также микроэлементов (Zn, Mn) в субстрате при добавлении активированного биоугля. В то же время выявлено снижение концентрации меди и алюминия, что может благоприятно сказаться на росте растений. Концентрация тяжелых металлов и неметаллов была невысокой (например, концентрация Cr в торфяных субстратах с биоуглем не превышала 2 мг/кг), что подтверждает потенциальную эффективность и экологическую безопасность использования биоуглей в качестве добавок к торфу.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение биоугля является перспективной стратегией замены части торфяных субстратов, способствуя повышению их питательной ценности и снижению добычи и потребления медленно возобновляемого ресурса. Оптимальные дозировки и формы биоугля требуют дальнейшего изучения, однако на основании проведенного исследования наиболее рациональным видится применение активированного измельченного биоугля в концентрации 10% об., что обеспечивает обогащение субстрата элементами питания при минимальном риске накопления потенциально токсичных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимова А.С.* Круговорот соединений фосфора в почве // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. Т. 134. № 8. С. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.38>.
2. *Беляцкий В.Н.* Основы методов атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектроскопии. Минск: БГМУ, 2015. 40 с.
3. В Тюмени будут развивать добычу торфа вместе с предприятиями Беларуси. URL: <https://tyumen-news.net/economy/2024/05/23/377097.html>.
4. *Василевич Р.С.* Макро-и микроэлементный состав мерзлотных бугристых торфяников лесотундры европейского северо-востока России // Геохимия. 2018. № 12. С. 1158–1172. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0016752518100126>.

5. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
6. *Карпенко Л.В.* Микроэлементный состав торфяных почв Нижнего Приангарья // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 4. С. 139–144.
7. *Микова Н.М., Иванов И.П., Жижаев А.М., Кузнецов Б.Н.* Влияние термощелочной активации NaOH коры лиственницы на структуру и сорбционные свойства полученных активных углей // Журнал Сибирского федерального университета Химия. 2024. № 17 (3). С. 407–418.
8. *Моисеева Е.В., Потапова И.А.* Атомно-абсорбционное определение ртути в моче методом холодного пара с использованием ртутно-гидридной приставки // Медицина труда и промышленная экология. 2019. Т. 59 № 10. С. 887–891. DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-10-887-891>.
9. *Московченко Д.В., Романенко Е.А.* Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 51–84. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-51-84>.
10. *Пономарев К.О., Дрягина А.А., Филимоненко Е.А., Димитрюк И.Д.* Влияние биоуглей на концентрацию доступных для растений элементов в почве // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. № 120. С. 265–294. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-265-294>.
11. *Спирина В.З., Соловьева Т.П.* Агрохимические методы исследования почв, растений и удобрений. Томск: ТГУ, 2014. 336 с.
12. *Степанова В.А., Покровский О.С.* Макроэлементный состав торфа выпуклых верховых болот средней тайги Западной Сибири (на примере болотного комплекса “Мухрино”) // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 352. С. 211–214.
13. *Табакаев Р.Б., Пономарев К.О., Калинин И.К., Гайдабрус М.А., Шулаев Н.А., Елецкий П.М.* Комплексная СВЧ-переработка высокосольного бурого угля для нужд энергетической и металлургической отраслей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4336>.
14. *Тимофеева М.В., Гончарова О.Ю., Матыйшак Г.В.* Вынос углерода из торфяных почв севера Западной Сибири в разных гидрологических условиях // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. № 119. С. 211–241. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-211-241>.

15. Тишкович А.В., Мееровский А.С., Вирысов Г.П., Усюкевич Г.А., Баранникова Е.В. Торф на удобрение // Наука и техника. Минск: Институт торфа АН БССР, 1983. 103 с.
16. Томина Е.В., Ходосова Н.А., Мануковская В.Е., Лукин А.Н., Корчагина А.Ю. Влияние ультразвуковой обработки на сорбционно-поверхностные характеристики березового биоугля // Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23. № 3. С. 384–394.
17. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Куликова Н.А. Термостабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020. № 8. С. 970–982. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0032180x20080080>.
18. Швартау В.В., Вирыч П.А., Маковейчук Т.И., Артеменко А.Ю. Кальций в растительных клетках // Вестник Днепропетровского университета. Серия: Биология. Экология. 2014. Т. 22. № 1. С. 19–32.
19. Яковлев Е.Ю., Дружинина А.С., Дружинин С.В., Бедрина Д.Д., Орлов А.С., Спиров Р.К., Жуковская Е.В. Оценка физико-химических параметров и распределения металлов в верховом болоте Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 115–120.
20. Яконовская Т.Б. Особенности применения доходного подхода к оценке стоимости бизнеса предприятий торфяной отрасли при выборе стратегических решений (часть 2) // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Науки об обществе и гуманитарные науки. 2024. № 1 (36). С. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.46573/2409-1391-2024-1-78-90>.
21. Ahmed N., Zhang B., Chachar Z., Li J., Xiao G., Wang, Q., Tu P. Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability // Scientia Horticulturae. 2024. Vol. 323. P. 112512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>.
22. Arbutov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia // Journal of Geochemical Exploration. 2018. Vol. 184. P. 40–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012>.
23. Beaulne J., Garneau M., Magnan G., Boucher É. Peat deposits store more carbon than trees in forested peatlands of the boreal biome // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 2657. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82004-x>.
24. Biederman L.A., Harpole W.S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta- analysis // GCB bioenergy. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 202–214. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
25. Bu X., Ji H., Ma W., Xian T., Zhou Z., Wang F., Xue J. Effects of biochar as

- a peat-based substrate component on morphological, photosynthetic and biochemical characteristics of *Rhododendron delavayi* Franch // *Scientia Horticulturae*. 2022. Vol. 302. P. 111148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111148>.
26. Chai W., Wang F., Miao Z., Che N. Chai W. Hydrophilic porous activated biochar with high specific surface area for efficient capacitive deionization // *Desalination and Water Treatment*. 2024. Vol. 320. P. 100617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100617>.
27. Chrysargris A., Prasad M., Kavanagh A., Tzortzakakis N. Biochar type, ratio, and nutrient levels in growing media affects seedling production and plant performance // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091421>.
28. De Melo C.A., De Oliveira L.K., Goveia D. Enrichment of tropical peat with micronutrients for agricultural applications: evaluation of adsorption and desorption processes // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2014 Vol. 25. P. 36–49. DOI: <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130265>.
29. De Tender C.A., Debode J., Vandecasteele B., D'Hose T., Cremelie P., Haegeman A., Maes M. Biological, physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar // *Applied Soil Ecology*. 2016. Vol. 107. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.001>.
30. Handiso B., Pääkkönen T., Wilson B.P. Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar // *Waste Management Bulletin*. 2024. Vol. 2. No. 4. P. 281–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.008>.
31. Huang L., Niu G., Feagley S.E., Gu M. Evaluation of a hardwood biochar and two composts mixes as replacements for a peat-based commercial substrate // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 129. P. 549–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.044>.
32. Kabir E., Kim K.H., Kwon E.E. Biochar as a tool for the improvement of soil and environment // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. P. 1324533. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>.
33. Lévesque V., Jeanne T., Dorais M., Ziadi N., Hogue R., Antoun H. Biochars improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium // *Applied soil ecology*. 2020. Vol. 153. P. 103579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103579>.
34. Lima J.Z., Ogura A.P., Espindola E.L. G., da Silva E.F., Rodrigues V.G.S. Post-sorption of Cd, Pb, and Zn onto peat, compost, and biochar: Short-term effects of ecotoxicity and bioaccessibility // *Chemosphere*. 2024. Vol. 352. P. 141521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141521>.
35. Liu Q., Zang G. L., Zhao Q. Removal of copper ions by functionalized

- biochar based on a multicomponent Ugi reaction // RSC advances. 2021. Vol. 11. No. 42. P. 25880–25891. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/D1RA04156H>.
36. *Margenot A.J., Griffin D.E., Alves B.S., Rippner D.A., Li C., Parikh S.J.* Substitution of peat moss with softwood biochar for soil-free marigold growth // *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 112. P. 160–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.053>.
37. *Méndez A, Paz-Ferreiro J, Gil E, Gascó G.* The effect of paper sludge and biochar addition on brown peat and coir based growing media properties // *Scientia Horticulturae*. 2015. Vol. 193. P. 225–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.032>.
38. *Nieto A., Gasco G., Paz-Ferreiro J., Fernández J. M., Plaza C., Mendez A.* The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties // *Scientia Horticulturae*. 2016. Vol. 199. P. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.012>.
39. *Osman A.I., Fawzy S., Farghali M., El-Azazy M., Elgarahy A.M., Fahim R.A.* Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2022. Vol. 20. No. 4. P. 2385–2485. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>.
40. *Qian T., Wang L., Le C., Zhou Y.* Low-temperature-steam activation of phosphorus in biochar derived from enhanced biological phosphorus removal (EBPR) sludge // *Water Research*. 2019. Vol. 161. P. 202–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.008>.
41. *Singh Yadav S.P., Bhandari S., Bhatta D., Poudel A., Bhattarai S., Yadav P., Oli B.* Biochar application: A sustainable approach to improve soil health // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. Vol. 11. P. 100498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>.
42. *Stanton C., Sanders D., Krämer U., Podar D.* Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification // *Molecular Plant*. 2022. Vol. 15. No. 1. P. 65–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008>.
43. *Tammeorg P., Brandstaka T., Simojoki A., Helenius J.* Nitrogen mineralisation dynamics of meat bone meal and cattle manure as affected by the application of softwood chip biochar in soil // *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. 2012. Vol. 103. No. 1. P. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1755691012000047>.
44. *Vasilevich R., Vasilevich M., Lodygin E., Abakumov E.* Geochemical characteristics of the vertical distribution of heavy metals in the hummocky peatlands of the cryolithozone // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20. No. 5. P. 3847. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20053847>.

45. Vaughn S.F., Kenar J.A., Thompson A.R., Peterson S.C. Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates // *Industrial crops and products*. 2013. Vol. 51. P. 437–443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.010>.
46. Wang D., Li B., Yang H., Zhao C., Yao D., Chen H. Influence of biochar on the steam reforming of biomass volatiles: effects of activation temperature and atmosphere // *Energy & Fuels*. 2019. Vol. 33. No. 3. P. 2328–2334. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04412>.
47. Wang L., Olsen M.N., Moni C., Dieguez-Alonso A., de la Rosa J.M., Stenrod M., Mao L. Comparison of properties of biochar produced from different types of lignocellulosic biomass by slow pyrolysis at 600 C // *Applications in Energy and Combustion Science*. 2022. Vol. 12. P. 100090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100090>.
48. Yan J., Yu P., Liu C., Li Q., Gu M. Replacing peat moss with mixed hardwood biochar as container substrates to produce five types of mint (*Mentha* spp.) // *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 155. P. 112820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112820>.
49. Zhang D., Peng Q., Yang R., Lin W., Wang H., Zhou W., Ouyang L. Slight carbonization as a new approach to obtain peat alternative // *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 202. P. 117041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117041>.
50. Zulfiqar F., Allaire S.E., Akram N.A., Méndez A., Younis A., Peerzada A.M., Wright S.R. Challenges in organic component selection and biochar as an opportunity in potting substrates: a review // *Journal of Plant Nutrition*. 2019. Vol. 42. No. 11–12. P. 1386–1401. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1617310>.

REFERENCES

1. Akimova A.S., Krugovorot soedinenii fosfora v pochve (The cycle of phosphorus compounds in soil), *International Research Journal*, 2023, Vol. 134, No. 8, pp. 1–4, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.38>.
2. Beliatsky V.N., *Osnovy metodov atomno-absorbtsionnoi i atomno-emissionnoi spektroskopii* (Fundamentals of atomic absorption and atomic emission spectroscopy). Minsk: BSMU, 2015, 40 p.
3. V Tyumeni budut razvivat' dobychu torfa vmeste s predpriyatiyami Belarusi. URL: <https://tyumen-news.net/economy/2024/05/23/377097.html>.
4. Vasilevich R.S., Makro- i mikroelementnyi sostav merzlotnykh bugristykh torfyanikov lesotundry evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Macro- and microelement composition of permafrost hummocky peatlands of the

European northeast of Russia), *Geokhimiya*, 2018, No. 12, pp. 1158– 1172, DOI: <https://doi.org/10.1134/s0016752518100126>.

5. Kabata-Pendias A., Pendias Kh., *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*, Moscow: Mir, 1989. 439 p.

6. Karpenko L.V., Mikroelementnyi sostav torfyanykh pochv Nizhnego Priangar'ya (Microelement composition of peat soils of the Lower Angara region), *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2009, No. 4, pp. 139–144.

7. Mikova N.M., Ivanov I.P., Zhizhaev A.M., Kuznetsov B.N., Vliyanie termoshchelochnoi aktivatsii NaOH kory listvennitsy na strukturu i sorbtsionnye svoystva poluchennykh aktivnykh uglei (Influence of thermalkali activation of NaOH bark of larch on structure and sorption properties of the received active carbon), *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Khimiya*, 2024, No. 17 (3), pp. 407–418.

8. Moiseeva E.V., Potapova I.A., Atomno-absorbtsionnoe opredelenie rtuti v moche metodom kholodnogo para s ispol'zovaniem rtutno-gidridnoi pristavki (Atomic absorption determination of mercury in urine by the method of cold vapor with the use of mercury hydride attachment), *Medsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, Vol. 59, No. 10, pp. 887–891, DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-10-887-891>.

9. Moskovchenko D.V., Romanenko E.A., Elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluve, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 103, pp. 51–84. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-51-84>.

10. Ponomarev K.O., Dryagina A.A., Filimonenko E.A., Dimitryuk I.D., Effect of biochars on the concentration of plant-available elements in the soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 120, pp. 265–294, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-265-294>.

11. Spirina V.Z., Solov'eva T.P., *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv, rastenii i udobrenii* (Agrochemical methods of studying soil, plants and fertilizers), Tomsk: TGU, 2014, 336 p.

12. Stepanova V.A., Pokrovskii O.S., Makroelementnyi sostav torfa vypuklykh verkhovykh bolot srednei taigi Zapadnoi Sibiri (Macroelement composition of peat from convex upland bogs of the middle taiga of Western Siberia) (na primere bolotnogo kompleksa “Mukhrino”) (using the example of the Mukhrino bog complex), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, No. 352, pp. 211–214.

13. Tabakaev R.B., Ponomarev K.O., Kalinich I.K., Gaidabrus M.A., Shulaev N.A., Eletsksii P.M., Kompleksnaya SVCh-pererabotka vysokozol'nogo burogo uglya dlya nuzhd energeticheskoi i metallurgicheskoi otraslei (Complex microwave processing of high-ash brown coal for the needs of the energy and metallurgical industries), *Izvestiya Tomskogo*

- politeknicheskogo universiteta Inzhiniring georesursov*, 2024, Vol. 335, No. 1, pp. 57–68, DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4336>.
14. Timofeeva M.V., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bochkova S.D., Kadulin M.S., Carbon leaching from peat soils of the north of Western Siberia under different hydrological conditions, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 119, pp. 211–241, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-119-211-241>.
15. Tishkovich A.V., Meerovskii A.S., Viryasov G.P., Usyukevich G.A., Barannikova E.V., Torf na udobrenie (Peat as fertilizer), *Nauka i tekhnika*, Minsk: In-t torfa AN BSSR, 1983. 103 p.
16. Tomina E.V., Khodosova N.A., Manukovskaya V.E., Lukin A.N., Korchagina A.Yu., Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki na sorbtсионно-poverkhnostnye kharakteristiki berezovogo biouglya (Influence of ultrasonic treatment on sorption-surface characteristics of birch biochar), *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2023, Vol. 23, No. 3, pp. 384–394.
17. Kholodov V.A., Farkhodov Yu.R., Yaroslavtseva N.V., Aidiev A.Yu., Lazarev V.I., Il'in B.S., Kulikova N.A., Termolabil'noe i termostabil'noe organicheskoe veshchestvo chernozemov raznogo zemlepol'zovaniya (Thermolabile and thermostable organic matter of chernozems of different land use), *Pochvovedenie*, 2020, No. 8, pp. 970–982, DOI: <https://doi.org/10.31857/s0032180x20080080>.
18. Shvartau V.V., Virych P.A., Makoveichuk T.I., Artemenko A.Yu., Kal'tsii v rastitel'nykh kletkakh (Calcium in plant cells), *Vestnik Dnepropetrovskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya*, 2014, Vol. 22, No. 1, pp. 19–32.
19. Yakovlev E.Yu., Druzhinina A.S., Druzhinin S.V., Bedrina D.D., Orlov A.S., Spirov R.K., Zhukovskaya E.V., Otsenka fiziko-khimicheskikh parametrov i raspredeleniya metallov v verkhovom bolote Arkhangel'skoi oblasti (Assessment of physical and chemical parameters and distribution of metals in the upper bog of the Arkhangelsk region), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, No. 5, pp. 115–120.
20. Yakonovskaya T.B., Osobennosti primeneniya dokhodnogo podkhoda k otsenke stoimosti biznesa predpriyatii torfyanoi otrasli pri vybore strategicheskikh reshenii (chast' 2) (Features of applying the income approach to assessing the value of businesses in the peat industry when choosing strategic solutions (part 2)), *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki ob obshchestve i gumanitarnye nauki*, 2024, No. 1 (36), pp. 78–90, DOI: <https://doi.org/10.46573/2409-1391-2024-1-78-90>.
21. Ahmed N., Zhang B., Chachar Z., Li J., Xiao G., Wang, Q., Tu P., Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability, *Scientia Horticulturae*, 2024, Vol. 323, P. 112512, DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>.

22. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V., Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia, *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, Vol. 184, pp. 40–48, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012>.

23. Beaulne J. Garneau M., Magnan G., Boucher É., Peat deposits store more carbon than trees in forested peatlands of the boreal biome, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, No. 1, pp. 2657, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82004-x>

24. Biederman L.A., Harpole W.S., Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta- analysis, *GCB bioenergy*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 202–214, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.

25. Bu X., Ji H., Ma W., Xian T., Zhou Z., Wang F., Xue J., Effects of biochar as a peat-based substrate component on morphological, photosynthetic and biochemical characteristics of *Rhododendron delavayi* Franch, *Scientia Horticulturae*, 2022, Vol. 302, pp. 111148, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111148>.

26. Chai W., Wang F., Miao Z., Che N., Chai W., Hydrophilic porous activated biochar with high specific surface area for efficient capacitive deionization, *Desalination and Water Treatment*, 2024, Vol. 320, pp. 100617, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100617>.

27. Chrysargris A., Prasad M., Kavanagh A., Tzortzakis N., Biochar type, ratio, and nutrient levels in growing media affects seedling production and plant performance, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, No. 9, pp. 1421, DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10091421>.

28. De Melo C.A., De Oliveira L.K., Goveia D., Enrichment of tropical peat with micronutrients for agricultural applications: evaluation of adsorption and desorption processes, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2014, Vol. 25, pp. 36–49, DOI: <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130265>.

29. De Tender C.A., Debode J., Vandecasteele B., D'Hose T., Cremelie P., Haegeman A., Maes M., Biological, physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar, *Applied Soil Ecology*, 2016, Vol. 107, pp. 1–12, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.001>.

30. Handiso B., Pääkkönen T., Wilson B.P., Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar, *Waste Management Bulletin*, 2024, Vol. 2, No. 4, pp. 281–287, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.008>.

31. Huang L., Niu G., Feagley S.E., Gu M., Evaluation of a hardwood biochar and two composts mixes as replacements for a peat-based commercial substrate, *Industrial Crops and Products*, 2019, Vol. 129, pp. 549–560, DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.044>.

32. Kabir E, Kim K.H., Kwon E.E., Biochar as a tool for the improvement of soil and environment, *Frontiers in Environmental Science*, 2023, Vol. 11, pp. 1324533, DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>.

33. Lévesque V., Jeanne T., Dorais M., Ziadi N., Hogue R., Antoun H., Biochars improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium, *Applied soil ecology*, 2020, Vol. 153, pp. 103579, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103579>.

34. Lima J.Z., Ogura A.P., Espíndola E.L.G., da Silva E.F., Rodrigues V.G.S., Post-sorption of Cd, Pb, and Zn onto peat, compost, and biochar: Short-term effects of ecotoxicity and bioaccessibility, *Chemosphere*, 2024, Vol. 352, pp. 141521, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141521>.

35. Liu Q., Zang G.L., Zhao Q., Removal of copper ions by functionalized biochar based on a multicomponent Ugi reaction // *RSC advances*, 2021, Vol. 11, No. 42, pp. 25880–25891, DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/D1RA04156H>.

36. Margenot A.J., Griffin D.E., Alves B.S., Rippner D.A., Li C., Parikh S.J., Substitution of peat moss with softwood biochar for soil-free marigold growth, *Industrial Crops and Products*, 2018, Vol. 112, pp. 160–169, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.053>.

37. Méndez A., Paz-Ferreiro J., Gil E., Gascó G., The effect of paper sludge and biochar addition on brown peat and coir based growing media properties, *Scientia Horticulturae*, 2015, Vol. 193, pp. 225–230, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.032>.

38. Nieto A., Gasco G., Paz-Ferreiro J., Fernández J.M., Plaza C., Mendez A., The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties, *Scientia Horticulturae*, 2016, Vol. 199, pp. 142–148, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.012>.

39. Osman A.I., Fawzy S., Farghali M., El-Azazy M., Elgarahy A.M., Fahim R.A., Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 2022, Vol. 20, No. 4, pp. 2385–2485, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>.

40. Qian T., Wang L., Le C., Zhou Y., Low-temperature-steam activation of phosphorus in biochar derived from enhanced biological phosphorus removal (EBPR) sludge, *Water Research*, 2019, Vol. 161, pp. 202–210, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.008>.

41. Singh Y.S.P., Bhandari S., Bhatta D., Poudel A., Bhattarai S., Yadav P., Oli B., Biochar application: A sustainable approach to improve soil health, *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, Vol. 11, pp. 100498, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>.

42. Stanton C., Sanders D., Krämer U., Podar D., Zinc in plants: Integrating

homeostasis and biofortification, *Molecular Plant*, 2022, Vol. 15, No. 1, pp. 65–85, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008>.

43. Tammeorg P., Brandstaka T., Simojoki A., Helenius J., Nitrogen mineralisation dynamics of meat bone meal and cattle manure as affected by the application of softwood chip biochar in soil, *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2012, Vol. 103, No. 1, pp. 19–30, DOI: <https://doi.org/10.1017/S1755691012000047>.

44. Vasilevich R., Vasilevich M., Lodygin E., Abakumov E., Geochemical characteristics of the vertical distribution of heavy metals in the hummocky peatlands of the cryolithozone, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 3847, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20053847>.

45. Vaughn S.F., Kenar J.A., Thompson A.R., Peterson S.C., Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates, *Industrial crops and products*, 2013, Vol. 51, pp. 437–443, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.010>.

46. Wang D., Li B., Yang H., Zhao C., Yao D., Chen H., Influence of biochar on the steam reforming of biomass volatiles: effects of activation temperature and atmosphere // *Energy & Fuels*, 2019, Vol. 33, No. 3, P. 2328–2334, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04412>.

47. Wang L., Olsen M. N., Moni C., Dieguez-Alonso A., de la Rosa J. M., Stenrød M., Mao L., Comparison of properties of biochar produced from different types of lignocellulosic biomass by slow pyrolysis at 600 C, *Applications in Energy and Combustion Science*, 2022, Vol. 12, pp. 100090, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100090>.

48. Yan J., Yu P., Liu C., Li Q., Gu M., Replacing peat moss with mixed hardwood biochar as container substrates to produce five types of mint (*Mentha* spp.), *Industrial Crops and Products*, 2020, Vol. 155, pp. 112820, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112820>.

49. Zhang D., Peng Q., Yang R., Lin W., Wang H., Zhou W., Ouyang L., Slight carbonization as a new approach to obtain peat alternative, *Industrial Crops and Products*, 2023, Vol. 202, pp. 117041, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117041>.

50. Zulfiqar F., Allaire S.E., Akram N.A., Méndez A., Younis A., Peerzada A.M., Wright, S.R., Challenges in organic component selection and biochar as an opportunity in potting substrates: a review, *Journal of Plant Nutrition*, 2019, Vol. 42, No. 11–12, pp. 1386–1401, DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1617310>.