 © Авторы статьи / Authors of the article

АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ/AGROCHEMISTRY, AGROSOIL SCIENCE, PLANT PROTECTION AND QUARANTINE

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2025.64.15 EDN: SGQUTE

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ И ГУМАТА КАЛИЯ НА СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ В МОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Научная статья

Якименко О.С.[1,] *, Журба В.С.[2]
[1] ORCID : 0000-0003-0499-5482;
[1, 2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (iakim[at]soil.msu.ru)

Предложена: 06.11.2025; Принята: 01.12.2025; Опубликована: 19.12.2025

Аннотация

В условиях модельного эксперимента изучено влияние двух видов биоугля (БУ) (из сидератов и из кофейной шелухи) по отдельности и в сочетании с гуматом калия на химические свойства и лабильный пул органического вещества дерново-подзолистой почвы. Проанализировано воздействие на свойства почвенного органического вещества, содержание подвижных форм элементов питания растений и рост тест-культуры. Показано, что все мелиоранты увеличивают pH почвы от 6,6 до 7,0–7,8; содержание подвижных форм калия — в 6–10 раз. Содержание общего C увеличилось на 0,4–0,8% в соответствии с внесенным количеством органических мелиорантов, но размер подвижного пула C как в водной, так и в щелочной вытяжках под воздействием обоих БУ не изменился. В условиях данного эксперимента органическое вещество БУ не трансформировалось и осталось в составе негидролизуемой части гумуса. Гумат калия как отдельно, так и в смеси с БУ увеличивает долю подвижных фракций ПОВ от 10 до 20–30% к Собщ. В фитотесте на проростках *T.aestivum* достоверный прирост биомассы тест-культуры не выявлен; в обеих комбинациях гумат-БУ биомасса снижалась до 62% к контролю. Потенциал БУ в качестве почвенных мелиорантов как по отдельности, так и в смеси с гуматом требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: биочар, органическое вещество почв, органические мелиоранты.

THE INFLUENCE OF BIOCHAR AND POTASSIUM HUMATE ON THE PROPERTIES OF SODDY PODZOLIC SOIL IN A MODEL EXPERIMENT

Research article

Yakimenko O.S.[1,] *, Zhurba V.S.[2]
[1] ORCID : 0000-0003-0499-5482;
[1, 2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (iakim[at]soil.msu.ru)

Suggested: 06.11.2025; Accepted: 01.12.2025; Published: 19.12.2025

Abstract

In a model experiment, the effect of two types of biochar (from green manure and coffee peel) separately and in combination with potassium humate on the chemical properties and labile pool of organic matter in soddy podzolic soil was studied. The impact on the properties of organic soil matter, the content of moving forms of plant nutrients, and the growth of test crops was analysed. It was shown that all soil improvers increase soil pH from 6.6 to 7.0–7.8; the content of moving forms of potassium increases 6–10 times. The total C content increased by 0.4–0.8% in accordance with the amount of organic ameliorants applied, but the size of the moving C pool in both aqueous and alkaline extracts did not change under the influence of both biochar substances. Under the conditions of this experiment, the organic matter of biochar did not transform and remained in the non-hydrolysable part of humus. Potassium humate, both separately and in mixture with biochar, increases the proportion of moving SOM fractions from 10 to 20–30%. In the phytotest on *T. aestivum* seedlings, no significant increase in the biomass of the test culture was detected; in both humate biochar combinations, the biomass decreased to 62% of the control. The potential of biochar as a soil ameliorants, both separately and in mixture with humate, requires further research.

Keywords: biochar, organic soil matter, organic ameliorants.

Введение

Биологическим углем (биоуголь или биочар) называют материал, получаемый из древесины и органических отходов путем пиролиза при температуре 300–800°C без доступа кислорода. В литературе активно обсуждается перспективность его применения для повышения плодородия почвы, улучшения ее способности удерживать воду и в качестве удобрения и почвоулучшителя [4], [7], [8], [14]. Предпосылками для этого являются высокое содержание углерода (60–80%) и высокая сорбционная емкость при значительной площади поверхности (около 30 $м^2/см^3$) за счет пористой структуры, что позволяет рассматривать биоуголь (БУ) как средство для увеличения гумусированности почв, оптимизации их водно-физических почв и для связывания тяжелых металлов и иных поллютантов в почвах.

В литературе описан целый ряд положительных эффектов БУ на свойства почв: повышение pH; увеличение катионо-обменной и сорбционной емкости, пористости и аэрации, влагоудерживающей способности и др. Ряд работ

 © Авторы статьи / Authors of the article

[1], [2], [5], [6] демонстрирует, что БУ оказывает влияние на ее поглотительную способность почвы, смачиваемость, кислотно-основную буферность и, как следствие, на миграционную способность катионов и анионов, а также органических молекул в почвах [10], [12]. В большинстве случаев отмечено увеличение урожайности культур, особенно при использовании на бедных почвах; предотвращение вымывания минеральных удобрений и тем самым увеличение пролонгированности их действия и снижение норм внесения; выраженное последействие в течение нескольких лет. В то же время описаны и случаи отсутствия положительного отклика растений и проявления токсичности по отношению к живым организмам [9], [11], [13].

Гуминовые вещества (ГВ) известны широким спектром положительных воздействий на химические и биологические свойства почв. В том числе показано, что они способны снижать токсичность высоких доз БУ. Исследований о совместном влиянии БУ и ГВ на агроэкологическую систему недостаточно. Предположительно, БУ в сочетании с гуматами могут оказать более выраженное оптимизирующее воздействие на свойства почвы: содержание гумуса, пулы питательных веществ, сорбцию и снижение токсичности поллютантов. Целью данной работы явилось изучение влияния двух видов БУ по отдельности и в сочетании с промышленным гуминовым препаратом гумата калия на химические свойства дерново-подзолистой почвы в серии модельных экспериментов и выявление их потенциала в качестве почвенных мелиорантов.

Методы и принципы исследования

В данном исследовании использовали два вида БУ: из сидератов (БУС) и из кофейной шелухи (БУШ, отход кофейного производства), а также промышленный гумат калия «Сахалинский». Образцы БУ получены методом медленного пиролиза в температурном диапазоне 360-380ºС на базе кафедры почвоведения ДВФУ. Гумат Сахалинский (СГ) производится методом щелочной экстракции из окисленного бурого угля (леонардита) группой компаний «Сахалинские гуматы»; представлен на рынке как органоминеральное удобрение и биостимулятор. Базовые свойства тестируемых мелиорантов представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные свойства органических мелиорантов

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2025.64.15.1

Препарат	pH	C общ %	N общ %	C/N	K общ, %	P общ, %
БУС	9,79	59,88	2,03	29,45	5,76	0,47
БУШ	9,69	64,78	2,29	28,32	6,67	0,20
СГ	9,45	38,03	1,25	30,34	10,11	0,20

Исследования проводили в условиях модельного опыта с использованием пахотного горизонта дерново-среднеподзолистой супесчаной почвы (Московская область, N 56º2′30,611″ E 37º10′29,993″) со следующими характеристиками: pH 6,6; C общ 1,42%; N общ 0,13%, песок 52%, пыль 39% и ил 9%. Образцы почвы высушивали, растирали и просеивали через сито с размером ячеек 2 мм. Навески по 200г воздушно-сухой почвы помещали в пластиковые контейнеры, добавляли сухие растертые БУ, СГ или их смесь (1:1) в дозе 1% по сухому веществу и тщательно перемешивали. Схема опыта включала варианты с внесением БУ из сидератов (БУС), БУ из кофейной шелухи (БУШ), гумата калия «Сахалинский (СГ), а также смесей БУ с гуматом в соотношении 1:1 (БУС+СГ и БУШ+СГ, по 0,5г/100г). Смеси увлажняли дистиллированной водой до 50% от полной влагоемкости и инкубировали 6 недель при комнатной температуре, поддерживая влажность в течение экспозиции. Повторность опыта 3-кратная.

После окончания инкубации в почвах опыта определяли pH, общее содержание C и N на элементном анализаторе CHN-analyzer ECS 8020 (NC Technologies, Italy), содержание подвижных фосфора и калия по Кирсанову, а также содержание углерода и азота в водной и 0,1н NaOH-вытяжках на анализаторе TOC-L-CPN (Shimadzu, Япония). Влияние препаратов на рост растений оценивали в аппликатном фитотесте на тест-культуре *Triticum aestivum* (пшеница озимая сорт «Ухторчанка»): семена пшеницы высевали в сосуды с почвами вариантов опыта, увлажняли до 60% ПВ и проращивали в климатокамере Binder при 23^0 С в режиме день/ночь; учет биомассы проростков проводили через 15 суток. Для всех экспериментов достоверность различий оценивали однофакторным дисперсионным анализом по критерию НСР по Фишеру, уровень значимости $p \leq 0,05$.

Основные результаты и обсуждение

Оба образца БУ получены из растительного сырья, и их базовые свойства сходны между собой: pH 9,7; 60–65% общего углерода, 2% общего азота, C/N 29, около 6% общего калия и менее 1% общего фосфора (Табл.1). Гумат калия отличается несколько пониженным содержанием общего углерода и азота (38 и 1% соответственно), но повышенным — калия, что обусловлено технологией его производства с использованием калийной щелочи.

Внесение всех мелиорантов в почву привело к подщелачиванию среды на 0,2–1,2 единиц pH (Табл. 2). Такой эффект обычно и наблюдается при внесении БУ, что позволяет рассматривать его как средство снижения кислотности кислых почв [14]. Гумат калия, будучи водорастворимым веществом с высоким значением pH, также повысил реакцию почвенного раствора. Степень выраженности этого эффекта была сравнима для всех мелиорантов, хотя максимальное повышение реакции среды до pH 7,8 наблюдали при добавлении БУ из кофейной шелухи.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 2 - Влияние мелиорантов на pH, содержание общего углерода и азота и подвижных калия и фосфора в почвах опыта

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2025.64.15.2

Вариант	pH	C общ	N общ	K_2O	P_2O_5
		%		мг/100г	
Контроль	6,6a	1,42a	0,13±0,01	21a	44a
БУС	7,0b	2,02bc	0,15±0,01	145b	47a
БУШ	7,8c	2,22b	0,17±0,03	149b	46a
СГ	7,2b	1,80c	0,14±0,01	201c	59b
СГ+БУС	7,0b	1,90c	0,15±0,02	172d	40c
СГ+БУШ	7,3b	1,85c	0,14±0,01	166d	41c

Примечание: буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величины НСР по Фишеру, уровень значимости p ≤0,05

В отношении влияния мелиорантов на содержание подвижных форм элементов минерального питания растений выявлено незначительное влияние на содержание фосфора и весьма существенное — калия (Табл.2). Так, для фосфора значимое накопление обнаружено только в варианте с гуматом. Однако при совместном применении БУ и СГ содержание подвижного фосфора достоверно снижалось до 40–41 мг P_2O_5/100 г против 44 мг P_2O_5/100 г на контроле. Это может указывать на связывание фосфора в труднодоступные формы вследствие сорбции на поверхности биоугля [6]. В отношении калия показано кратное увеличение его концентрации по сравнению с контролем (21 мг K_2O/100г) при внесении всех органических добавок. Наиболее высокие значения зафиксированы в варианте с гуматом, что обусловлено высоким содержанием калия в самом «Сахалинском гумате» (около 10%). БУС и БУШ также способствовали увеличению содержания калия примерно до 150 K_2O/100г, что может быть связано с высоким содержанием калия в биоуглях (6–7%, табл.1). Совместное применение гумата с биоуглями привело к промежуточным результатам: в вариантах СГ+БУС и СГ+БУШ содержание калия составило 172 и 166 мг/кг K_2O/100г соответственно. Это свидетельствует о возможном сорбционном взаимодействии между компонентами смеси и более равномерном поступлении калия в почвенный раствор.

Под воздействием органических добавок содержание общего углерода увеличилось в соответствии с внесенным количеством С и возросло от 1,4% на контроле до 1,8–2,2% (Табл.2). При добавлении смесей БУ и СГ содержание общего углерода также возросло, хотя и менее существенно, и при этом между собой смеси статистически значимо не отличались. В отношении содержания общего азота статистически значимого увеличения $N_{общ}$ не выявлено.

Факт увеличения содержания общего углерода под воздействием БУ показан в многочисленных публикациях [2], [3], [10]. Но при этом важно оценивать влияние БУ не только на общее содержание органического вещества почв (ПОВ), но и состав и соотношение лабильных и стабильных пулов ПОВ. Такую информацию позволяет получить анализ содержания подвижных фракций гумуса, переходящих в водную и щелочную вытяжки. На рис.1. представлено абсолютное содержание водорастворимого и щелочно-растворимого С в почвах вариантов опыта, а в табл.3 — относительное содержание С и N в процентах к общему содержанию углерода и азота.

 © Авторы статьи / Authors of the article

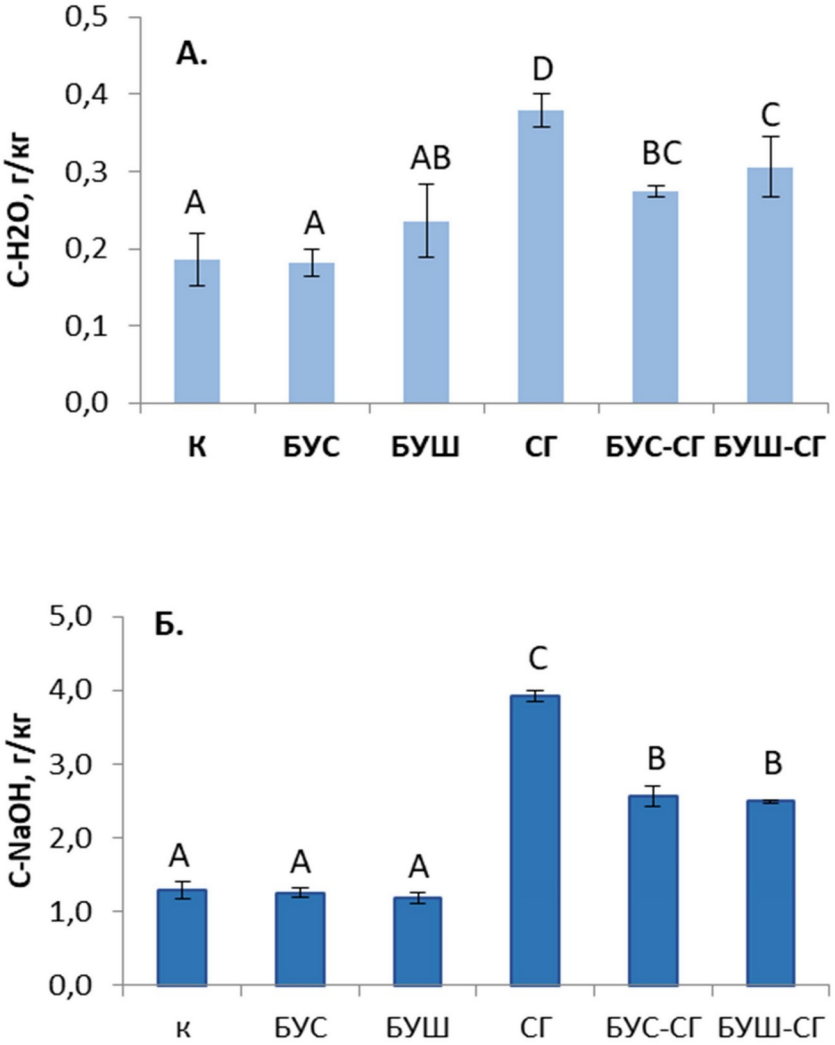

Рисунок 1 - Влияние мелиорантов на содержание подвижного пула С:
в водной вытяжке (*А*) и щелочной вытяжке (*Б*)
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2025.64.15.3

Примечание: буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величины НСР по Фишеру, уровень значимости p ≤0,05

Внесение обоих видов БУ не привело к увеличению лабильного С ни в водном, ни в щелочном экстракте, значения не отличались от контрольного варианта (рис.1 А и Б), составляя 0,18–0,24 и 1,2–1,3 г/кг соответственно. В относительном выражении объем лабильного пула С и вовсе снизился на 0,2–0,4% для водорастворимого и на 2,8–3,8% для щелочнорастворимого С (табл.3). Сходная ситуация наблюдается с пулом азота: несмотря на небольшое увеличение $N_{общ}$ при внесении БУ, доля его лабильных фракций в составе общего азота снижается (табл.3). Это свидетельствует о биохимически устойчивом характере органического вещества БУ и его накоплении в составе стабильных фракций ПОВ.

Значимое увеличение лабильного пула С выявлено только в вариантах, содержащих гумат (рис.1 А и Б и табл.3). Последний обладает высокой подвижностью и обогащает почву лабильными гуминовыми веществами как в составе водной, так и щелочной вытяжек. Совместное внесение СГ с биоуглями привело к снижению концентрации углерода в обеих вытяжках по сравнению с использованием одного только гумата, что подтверждает вывод о том, что гуминовые вещества содержит только гумат калия, а органическое вещество БУ представлено неразлагаемым материалом. Сходные результаты получены в работе [3], где наибольшее накопление С в почве при внесении БУ обнаружено в виде лигнина.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 3 - Содержание углерода и азота в водном и щелочном экстрактах из почв

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2025.64.15.4

Вариант	Водный экстракт		NaOH- экстракт	
	C-H_2O, % к Собщ	N-H_2O, % к Nобщ	C-NaOH, % к Собщ	N-NaOH, % к Nобщ
Контроль	1,31	3,73	9,05	11,73
БУС	0,90	2,94	6,22	9,69
БУШ	1,06	2,86	5,33	7,85
СГ	2,11	4,01	21,70	19,89
СГ+БУС	1,44	3,29	13,45	15,13
СГ+БУШ	1,66	3,92	13,54	15,34

Таблица 4 - Влияние мелиорантов на рост проростков *T. aestivum* в аппликатном фитотесте

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2025.64.15.5

Вариант	Энергия прорастания	Биомасса	
	%	мг /сосуд	% к контр
Контроль	78±10	102±17	100a
БУС	56±19	76±28	75ab
БУШ	56±10	106±13	104a
СГ	83±29	111±15	109a
СГ+БУС	39±10	63±15	62b
СГ+БУШ	61±42	63±27	62b

Примечание: буквами указана принадлежность средних значений к гомогенной группе на основании величины НСР по Фишеру, уровень значимости р ≤0,05

Влияние мелиорантов на рост растений оценивали в аппликатном фитотесте, результаты которого представлены в табл. 4. Положительное воздействие на рост проростков оказал только гумат, увеличивая энергию прорастания и биомассу растений, хотя различия статистически недостоверны. Внесенные отдельно, оба БУ несколько снижали энергию прорастания, но по-разному воздействовали на биомассу: вариант с БУС снижал биомассу до 75% к контролю, а БУШ — увеличивал до 105%. Иными словами, СГ и БУШ стимулирует рост проростков, а БУС, наоборот, ингибирует. В вариантах с обеими комбинациями гумат-БУ не только не наблюдали дополнительного стимулирующего эффекта, но, наоборот, зафиксировано угнетение проростков и снижение биомассы до 62% к контролю.

Заключение

В условиях данного модельного эксперимента все мелиоранты увеличивали pH почвы от 6,6 до 7,0–7,8; содержание подвижных форм калия — в 6–10 раз, но не влияли на содержание подвижных форм фосфора.

Общее содержание углерода увеличилось на 0,4–0,8% в соответствии с внесенным количеством органических мелиорантов, но на размер подвижного пула С как в водной, так и в щелочной вытяжках оба БУ не влияли. Тогда как СГ отдельно и в смеси с БУ увеличивал долю подвижных фракций почвенного органического вещества от 10 до 20–30% к Собщ. Таким образом, в условиях этого эксперимента органическое вещество БУ не трансформировалось и осталось в составе негидролизуемой части гумуса.

В фитотесте на проростках пшеницы прирост биомассы тест-культуры выявлен только в вариантах в БУШ и СГ составил 4–9% к контролю, хотя различия статистически недостоверны. При внесении БУС и обеих комбинаций гумата с БУ выявлено снижение биомассы до 62–75% к контролю.

По совокупности полученных данных можно заключить, что влияние БУ на свойства почвы различно в зависимости от состава сырья: БУШ оказывает более положительное воздействие по комплексу показателей по сравнению с БУС. Можно предположить, что различия во влиянии на почвенные свойства обусловлены различной удельной поверхностью, наличием функциональных групп на поверхности БУ или другими характеристиками, требующими дальнейшего изучения. Их потенциал в качестве почвенных мелиорантов как по отдельности, так и в смеси с гуматом требует дальнейшего изучения.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания 121040800154-8.

Благодарности

Авторы выражают благодарность кбн, доценту кафедры почвоведения ДВФУ О.В. Нестеровой за предоставление образцов биоуглей.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The study was performed within the framework of state assignment 121040800154-8.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to O.V. Nesterova, Associate Professor of the Chair of Soil Science at Far Eastern Federal University, for providing samples of biochar.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Бовсун М.А. Влияние внесения биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур / М.А. Бовсун, О.В. Нестерова, В.А. Семаль [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Биология. — 2023. — № 61. — С. 6–26. — DOI: 10.17223/19988591/61/1.
2. Бойцова Л.В. Агрохимические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы разной степени окультуренности при внесении биоугля / Л.В. Бойцова, Е.Я. Рижия // Агрохимия. — 2022. — № 7. — С. 14–23.
3. Бойцова Л.В. Индивидуальные органические соединения дерново-подзолистой супесчаной почвы при внесении биоугля / Л.В. Бойцова, Е.Я. Рижия, В.Е. Вертебный // Агрохимия. — 2022. — № 11. — С. 26–32. — DOI: 10.31857/S0002188122110035. — EDN: ZRJQAQ.
4. Брикманс А.В. Сравнительный анализ биоуглей из различных источников растительного происхождения / А.В. Брикманс, О.В. Нестерова // Проблемы и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов: Сборник докладов VI Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук, Курск, 26–28 июня 2024 года. — Курск: Курский федеральный аграрный научный центр, 2024. — С. 169–171.
5. Дубровина И.А. Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии / И.А. Дубровина // Почвоведение. — 2021. — № 12. — С. 1523–1534.
6. Дубровина И.А. Изменение фосфатного режима почв средней тайги при применении биоугля / И.А. Дубровина // Почвоведение. — 2023. — № 3. — С. 405–414.
7. Кулагина В.И. Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия / В.И. Кулагина [и др.] // Аграрный научный журнал. — 2019. — № 1. — С. 16–20.
8. Литвинович А.В. Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) / А.В. Литвинович [и др.] // Агрохимия. — 2016. — № 9. — С. 39–46.
9. Пукальчик М.А. Сравнение ремедиационных эффектов биочара и лигногумата на почвы при полиметаллическом загрязнении / М.А. Пукальчик [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. — 2016. — № 2. — С. 79–85.
10. Рижия Е.Я. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) / Е.Я. Рижия [и др.] // Почвоведение. — 2015. — № 2. — С. 211–220.
11. Терехова В.А. Фитотоксичность тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности / В.А. Терехова [и др.] // Почвоведение. — 2021. — № 6. — С. 757–768.
12. Ćwieląg-Piasecka I. Humic acid and biochar as specific sorbents of pesticides / I. Ćwieląg-Piasecka [et al.] // Journal of Soils and Sediments. — 2018. — Vol. 18. — № 8. — P. 2692–2702.
13. Holatko J. Humic acid mitigates the negative effects of high rates of biochar application on microbial activity / J. Holatko [et al.] // Sustainability. — 2020. — Vol. 12. — № 22. — P. 9524.
14. Jeffery S. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis / S. Jeffery [et al.] // Agriculture, ecosystems & environment. — 2011. — Vol. 144. — № 1. — P. 175–187.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bovsun M.A. Vliyanie vneseniya biouglya na urozhainost selskokhozyaistvennikh kultur [The effect of biochar application on crop yields] / M.A. Bovsun, O.V. Nesterova, V.A. Semal [et al.] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya [Bulletin of Tomsk State University. Biology]. — 2023. — № 61. — P. 6–26. — DOI: 10.17223/19988591/61/1. [in Russian]
2. Boitsova L.V. Agrokhimicheskie svoistva dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvi raznoi stepeni okulturennosti pri vnesenii biouglya [Agrochemical properties of sod-podzolic sandy loam soil of varying degrees of cultivation when biochar is applied] / L.V. Boitsova, Ye.Ya. Rizhiya // Agrokhimiya [Agrochemistry]. — 2022. — № 7. — P. 14–23. [in Russian]
3. Boitsova L.V. Individualnie organicheskie soedineniya dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvi pri vnesenii biouglya [Individual organic compounds of sod-podzolic sandy loam soil when biochar is applied] / L.V. Boitsova, Ye.Ya. Rizhiya, V.E. Vertebnii // Agrokhimiya [Agrochemistry]. — 2022. — № 11. — P. 26–32. — DOI: 10.31857/S0002188122110035. — EDN: ZRJQAQ. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

4. Brikmans A.V. Sravnitelnii analiz biouglei iz razlichnikh istochnikov rastitelnogo proiskhozhdeniya [Comparative analysis of biochar from various plant sources] / A.V. Brikmans, O.V. Nesterova // Problemi i perspektivi nauchno-innovatsionnogo obespecheniya agropromishlennogo kompleksa regionov: Sbornik dokladov VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 300-letiyu Rossiiskoi akademii nauk, Kursk, 26–28 iyunya 2024 goda [Problems and prospects of scientific and innovative support for the agro-industrial complex of regions: Collection of reports from the VI International Scientific and Practical Conference dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, Kursk, 26–28 June 2024]. — Kursk: Kursk Federal Agricultural Scientific Centre, 2024. — P. 169–171. [in Russian]

5. Dubrovina I.A. Vliyanie biouglya na agrokhimicheskie pokazateli i fermentativnuyu aktivnost pochv srednei taigi Karelii [The influence of biochar on agrochemical indicators and enzymatic activity of soils in the middle taiga zone of Karelia] / I.A. Dubrovina // Pochvovedenie [Soil Science]. — 2021. — № 12. — P. 1523–1534. [in Russian]

6. Dubrovina I.A. Izmenenie fosfatnogo rezhima pochv srednei taigi pri primenenii biouglya [Changes in the phosphate regime of soils in the middle taiga zone when biochar is applied] / I.A. Dubrovina // Pochvovedenie [Soil Science]. — 2023. — № 3. — P. 405–414. [in Russian]

7. Kulagina V.I. Vliyanie biouglya na strukturu pochvi i soderzhanie form kaliya [The influence of biochar on soil structure and potassium content] / V.I. Kulagina [et al.] // Agrarnii nauchnii zhurnal [Agricultural Scientific Journal]. — 2019. — № 1. — P. 16–20. [in Russian]

8. Litvinovich A.V. Meliorativnie svoistva i udobritelnaya tsennost razlichnikh po razmeru fraktsii biouglya (po dannim laboratornikh eksperimentov) [Meliorative properties and fertilising value of biochar fractions of various sizes (based on laboratory experiments)] / A.V. Litvinovich [et al.] // Agrokhimiya [Agrochemistry]. — 2016. — № 9. — P. 39–46. [in Russian]

9. Pukalchik M.A. Sravnenie remediatsionnikh effektov biochara i lignogumata na pochvi pri polimetallicheskom zagryaznenii [Comparison of the remediation effects of biochar and lignohumate on soils with polymetallic contamination] / M.A. Pukalchik [et al.] // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]. — 2016. — № 2. — P. 79–85. [in Russian]

10. Rizhiya Ye.Ya. Vliyanie biouglya na svoistva obraztsov dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvi s raznoi stepenyu okulturennosti (laboratornii eksperiment) [The influence of biochar on the properties of samples of sod-podzolic sandy loam soil with varying degrees of cultivation (laboratory experiment)] / Ye.Ya. Rizhiya [et al.] // Pochvovedenie [Soil Science]. — 2015. — № 2. — P. 211–220. [in Russian]

11. Terekhova V.A. Fitotoksichnost tyazhelikh metallov v dernovo-podzolistikh pochvakh raznoi stepeni okulturennosti [Phytotoxicity of heavy metals in sod-podzolic soils of varying degrees of cultivation] / V.A. Terekhova [et al.] // Pochvovedenie [Soil Science]. — 2021. — № 6. — P. 757–768. [in Russian]

12. Ćwieląg-Piasecka I. Humic acid and biochar as specific sorbents of pesticides / I. Ćwieląg-Piasecka [et al.] // Journal of Soils and Sediments. — 2018. — Vol. 18. — № 8. — P. 2692–2702.

13. Holatko J. Humic acid mitigates the negative effects of high rates of biochar application on microbial activity / J. Holatko [et al.] // Sustainability. — 2020. — Vol. 12. — № 22. — P. 9524.

14. Jeffery S. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis / S. Jeffery [et al.] // Agriculture, ecosystems & environment. — 2011. — Vol. 144. — № 1. — P. 175–187.