

Изменение свойств почвы и морфометрических параметров пшеницы при внесении биоугля: вегетационный эксперимент

А. А. Бетехтина[✉], О. А. Некрасова, А. В. Малахеева, С. А. Черепанов, В. В. Валдайских
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

[✉]E-mail: A.A.Betekhtina@urfu.ru

Аннотация. Цель работы – оценить влияние биоугля на физико-химические свойства почвы и морфометрические и некоторые химические характеристики пшеницы твердой (*Triticum durum* L.) и по состоянию растений косвенно оценить доступность макроэлементов в системе почва – биоуголь. **Методы.** Биоуголь получили из березового опила при температуре 500 °С и внесли в количестве 2 % от массы воздушно-сухой почвы. **Результаты.** В результате проведения вегетационного эксперимента показано, что внесение биоугля в тяжелосуглинистую агродерново-подзолистую почву привело к увеличению значений рН водной вытяжки и содержания общего азота, но при этом – к значительному снижению содержания общего органического углерода. Несмотря на улучшение некоторых почвенных характеристик, внесение биоугля не повлияло на высоту растений, массу листьев, массу корней, содержание азота и фосфора в листьях и зерне, а также отрицательно сказалось на общей массе растений и массе зерновок, которые снизились соответственно на 15 % и 18 % по сравнению с контролем. Внесение биоугля оказало влияние на строение корневой системы пшеницы: ее разветвленность увеличилась, в то время как диаметр поглощающих корней достоверно уменьшился. В эксперименте также отмечен рост микоризации корней за счет функциональных структур гриба – арбускул и везикул. **Научная новизна** заключается в том, что впервые в результате вегетационного эксперимента по внесению биоугля из березового опила в тяжелосуглинистую агродерново-подзолистую почву показано, что высокое содержание питательных веществ в почве с биоуглем еще не означает их доступность для растений. Полученные в работе результаты могут быть использованы для разработки технологий использования биоугольных мелиорантов в различных почвах.

Ключевые слова: биоуголь, агродерново-подзолистая почва, физико-химические характеристики почвы, *Triticum durum*, азот и фосфор в растениях, корневая система, поглощающие корни, арбускулярная микориза

Для цитирования: Бетехтина А. А., Некрасова О. А., Малахеева А. В., Черепанов С. А., Валдайских В. В. Изменение свойств почвы и морфометрических параметров пшеницы при внесении биоугля: вегетационный эксперимент // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 03. С. 298–308. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-298-308>.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (тема № FEUZ-2023-0023).

Дата поступления статьи: 28.07.23, **дата рецензирования:** 17.10.2023, **дата принятия:** 14.12.2023.

Changes in soil properties and morphometric parameters of wheat when applying biochar: vegetation experiment

A. A. Betekhtina[✉], O. A. Nekrasova, A. V. Malakheeva, S. A. Cherepanov, V. V. Valdayskikh
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia
[✉]E-mail: A.A.Betekhtina@urfu.ru

Abstract. The purpose of this work is to evaluate the effect of biochar on the physico-chemical properties of the soil and morphometric and some chemical characteristics of durum wheat (*Triticum durum* L.) and indirectly assess the availability of macronutrients in the soil-biochar system based on the state of plants. **Methods.** Biochar was obtained from birch sawdust at a temperature of 500 °C and was applied in the amount of 2 % of the weight of air-dry soil. **Results.** As a result of the vegetation experiment, it was revealed that the application of biochar led to changes in the properties of heavy-loamy agro-soddy-podzolic soil – a significant increase in the pH values of the water extract and the total nitrogen content, but at the same time – to a significant decrease in the content of total organic carbon content. Despite the improvement of some soil characteristics, the application of biochar did not affect the height of plants, leaf weight, root weight, nitrogen and phosphorus content in leaves and yield, and also negatively affected the total weight of plants and the weight of grains, which decreased by 15 % and 18 %, respectively, compared to control. The application of biochar had an impact on the structure of the wheat root system – its branching increased, while the diameter of the absorbing roots significantly decreased. The experiment also showed an increase in mycorrhization of roots due to the functional structures of the fungus – arbuscules and vesicles. **The scientific novelty** lies that the application of biochar from birch sawdust, despite the improvement of some physico-chemical characteristics of the soil, negatively affects the growth of wheat. The reaction of the aboveground parts of plants and the root system indirectly indicates a decrease in the availability of nutrients in the soil-biochar system. The results obtained in the work can be used to develop technologies for the use of biochar meliorants in various soils.

Keywords: biochar, agro-soddy-podzolic soil, soil physico-chemical characteristics, *Triticum durum*, nitrogen and phosphorus in plants, root system, absorbing roots, arbuscular mycorrhiza

For citation: Betekhtina A. A., Nekrasova O. A., Malakheeva A. V., Cherepanov S. A., Valdayskikh V. V. Changes in soil properties and morphometric parameters of wheat when applying biochar: vegetation experiment. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (03): 298–308. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-298-308>. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education (topic No. FEUZ-2023-0023).

Date of paper submission: 28.07.23, **date of review:** 17.10.2023, **date of acceptance:** 14.12.2023.

Постановка проблемы (Introduction)

С целью регуляции содержания парниковых газов в атмосфере появилась необходимость эффективной секвестрации углерода, в том числе в почвах сельскохозяйственного назначения [1]. С точки зрения совместного решения двух задач – секвестрации углерода и улучшения физико-химических свойств почвы – эффективно внесение в почву биоугля. Биоуголь – это углеродсодержащий продукт, получаемый при нагревании биомассы в среде с ограниченным доступом кислорода (пиролизе). Внесение биоугля неоднозначно влияет на свойства почвы и, соответственно, на рост и развитие растений. Некоторые экспериментальные данные свидетельствуют, что добавление биоугля оказывает стимулирующее воздействие на продуктивность сельскохозяйственных культур [2; 3]. В других ис-

следованиях показан нейтральный или негативный эффект [4]. Это может быть обусловлено комплексом причин. Во-первых, биоуголь содержит питательные вещества с различной степенью доступности, которые могут выступать в качестве прямого источника биогенных элементов [5]. Во-вторых, биоуголь может изменять доступность питательных веществ за счет изменения pH почвы, микробной активности почвы и путем удержания питательных веществ за счет катионного обмена и/или сорбции на пористой поверхности. Также за счет высокой пористости и удельной площади гидрофильной поверхности биоуголь способен удерживать влагу [6]. В-третьих, биоуголь может снижать доступность питательных веществ и содержать токсичные вещества для растений [1]. Получены многочисленные данные по реакции разных типов почв и ви-

дов растений на внесение биоуглей разных типов. Прогнозирование поведения системы почва – биоуголь – растение в конкретных региональных условиях на основе уже опубликованных данных не гарантирует успеха. Для выявления эффективности внесения биоугля для улучшения агрохимических свойств почв необходимо учитывать много факторов, в том числе доступность питательных веществ для растений в биоугле, в почве и в системе биоуголь – почва. Высокое содержание питательных веществ в почве с биоуглем еще не означает их доступность для растений. Об уменьшении доступности питательных веществ можно судить по снижению продуктивности растений, в том числе содержания макроэлементов в листьях и плодах [7], а также по реакции корневой системы. Рост растений наиболее отзывчив на доступность в почве азота, фосфора и калия. В ответ на дефицит питательных веществ наряду со снижением биомассы растений и содержания в ней азота и фосфора увеличиваются микоризообразование, разветвленность корневой системы, доля подземной биомассы в общей массе и удельная длина корней, а также происходит снижение диаметра корня [8–10].

Цель настоящей работы – оценить влияние биоугля на физико-химические свойства почвы и

морфометрические и некоторые химические параметры пшеницы твердой (*Triticum durum* L.) и по состоянию растений косвенно оценить доступность макроэлементов в системе почва – биоуголь.

Методология и методы исследования (Methods)

Эксперимент проводили в теплице Уральского Федерального университета с 28.06.2019 по 20.08.2019. Растения *Triticum durum* выращивали в вегетационных стаканах, заполненных почвой из гумусового горизонта (глубина 0–20 см) агродерново-подзолистой почвы.

Растения выращивали в течение 53 суток при температуре 20 ± 7 °C и относительной влажности почвы 60 %. Изучали действие биоугля на физико-химические свойства почвы и рост пшеницы. Биоуголь вносили в дозе 0 % (контроль) и 2 % (эксперимент) от массы воздушно-сухой почвы. Для каждого варианта опыта было заложено по 5 повторностей, которые располагали в теплице случайным образом.

Биоуголь был получен из березового опила путем пиролиза при 540 °C в электропечи для лабораторного коксования (ГОСТ 9521-74). Нагрев биомассы осуществляли от 100 °C, скорость нагрева равнялась 5 °C/мин, продолжительность нагрева до 300 °C составляла 60 мин., до 500 °C – 100 мин.

Таблица 1
Физико-химические характеристики исходной почвы, биоугля и почвы с внесенным биоуглем (среднее \pm ошибка среднего)

| Показатель | Объекты исследования | | |
|--|----------------------|------------------|------------------|
| | Исходная почва | Биоуголь | Почва + биоуголь |
| Плотность, г/см ³ | 0,78 \pm 0,02 | 0,08 \pm 0,002 | 0,77 \pm 0,01 |
| Плотность твердой фазы, г/см ³ | 1,75 \pm 0,04 | 0,51 \pm 0,04 | 1,68 \pm 0,05 |
| pH _{H2O} | 4,92 \pm 0,04 | 6,76 \pm 0,02 | 4,94 \pm 0,04 |
| pH _{KCl} | 4,16 \pm 0,01 | 5,57 \pm 0,07 | 4,19 \pm 0,01 |
| C _{орг.} , % | 7,11 \pm 0,08 | 37,79 \pm 2,00 | 7,75 \pm 0,07 |
| N _{общ.} , % | 0,46 \pm 0,01 | 0,22 \pm 0,01 | 0,45 \pm 0,01 |
| K ₂ O, мг / 100 г почвы | 18,8 \pm 0,4 | 105,5 \pm 1,7 | 20,3 \pm 0,4 |
| P ₂ O ₅ , мг / 100 г почвы | 7,8 \pm 0,3 | 1,8 \pm 0,1 | 8,0 \pm 0,4 |

Table 1
Physico-chemical characteristics of the initial soil, biochar and soil with introduced biochar (average \pm average error)

| Indicator | Objects of research | | |
|--|---------------------|------------------|-----------------|
| | Initial soil | Biochar | Soil + biochar |
| Volumeweight, g/cm ³ | 0.78 \pm 0.02 | 0.08 \pm 0.002 | 0.77 \pm 0.01 |
| Density of the solid phase, g/cm ³ | 1.75 \pm 0.04 | 0.51 \pm 0.04 | 1.68 \pm 0.05 |
| pH _{H2O} | 4.92 \pm 0.04 | 6.76 \pm 0.02 | 4.94 \pm 0.04 |
| pH _{KCl} | 4.16 \pm 0.01 | 5.57 \pm 0.07 | 4.19 \pm 0.01 |
| TOC, % | 7.11 \pm 0.08 | 37.79 \pm 2.00 | 7.75 \pm 0.07 |
| TON, % | 0.46 \pm 0.01 | 0.22 \pm 0.01 | 0.45 \pm 0.01 |
| K ₂ O, mg / 100 g of soil | 18.8 \pm 0.4 | 105.5 \pm 1.7 | 20.3 \pm 0.4 |
| P ₂ O ₅ , mg / 100 g of soil | 7.8 \pm 0.3 | 1.8 \pm 0.1 | 8.0 \pm 0.4 |

Физико-химические характеристики почвы без внесения и с внесением биоугля после выращивания пшеницы (среднее \pm ошибка среднего)

| Показатель | Варианты опыта | | | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Почва | | Почва с биоуглем | |
| | Значение показателя | Динамика показателя | Значение показателя | Динамика показателя |
| Плотность, г/см ³ | 0,61 \pm 0,01 | -0,17 | 0,58 \pm 0,01 | -0,19 |
| Плотность твердой фазы, г/см ³ | 1,70 \pm 0,04 | -0,05 | 1,65 \pm 0,04 | -0,03 |
| pH _{H2O} | 4,80 \pm 0,17 | -0,12 | 5,26 \pm 0,02 | +0,32 |
| pH _{KCl} | 4,23 \pm 0,02 | +0,07 | 4,33 \pm 0,01 | +0,14 |
| C _{орг.} , % | 6,83 \pm 0,18 | -0,28 | 7,21 \pm 0,12 | -0,54 |
| N _{общ.} , % | 0,46 \pm 0,01 | 0 | 0,50 \pm 0,01 | +0,05 |
| K ₂ O, мг / 100 г почвы | 5,6 \pm 0,06 | -13,1 | 5,7 \pm 0,1 | -14,7 |
| P ₂ O ₅ , мг / 100 г почвы | 7,0 \pm 0,6 | -0,8 | 7,6 \pm 0,4 | -0,4 |

Table 2
Physico-chemical characteristics of the soil without and with the application of biochar after wheat cultivation (average \pm average error)

| Indicator | Experience options | | | |
|--|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | Soil | | Soil with biochar | |
| | Indicator value | Indicator dynamics | Indicator value | Indicator dynamics |
| Volume weight, g/cm ³ | 0.61 \pm 0.01 | -0.17 | 0.58 \pm 0.01 | -0.19 |
| Density of the solid phase, g/cm ³ | 1.70 \pm 0.04 | -0.05 | 1.65 \pm 0.04 | -0.03 |
| pH _{H2O} | 4.80 \pm 0.17 | -0.12 | 5.26 \pm 0.02 | +0.32 |
| pH _{KCl} | 4.23 \pm 0.02 | +0.07 | 4.33 \pm 0.01 | +0.14 |
| TOC, % | 6.83 \pm 0.18 | -0.28 | 7.21 \pm 0.12 | -0.54 |
| TN, % | 0.46 \pm 0.01 | 0 | 0.50 \pm 0.01 | +0.05 |
| K ₂ O, mg / 100 g of soil | 5.6 \pm 0.06 | -13.1 | 5.7 \pm 0.1 | -14.7 |
| P ₂ O ₅ , mg / 100 g of soil | 7.0 \pm 0.6 | -0.8 | 7.6 \pm 0.4 | -0.4 |

По окончании эксперимента, после выкапывания растений, субстрат исследовали лабораторными методами. Для этого образцы исходной почвы, биоугля, почвы после выращивания пшеницы, а также почвы с внесенным биоуглем после выращивания пшеницы (все в 5 повторностях) подготовили для анализов по стандартной методике. Плотность почвы и плотность твердой фазы почвы определяли в соответствии с ГОСТ 5180-2015; pH – с помощью потенциометра «Анион 4100» (Россия); общий органический углерод (C_{орг.}) – методом мокрого сжигания по Тюрину; общий азот (N_{общ.}) – по Кельдалю (с использованием оборудования VELP Scientifica) Италия), подвижный фосфор (P₂O₅) – по Кирсанову (с помощью спектрофотометра UV Probe-1650, Япония), подвижный калий (K₂O) – в 0,2 н вытяжке HCl пламенно-фотометрическим методом [11; 12].

Растения выкапывали целиком, высушивали 48 ч при 70 °С, разделяли на органы и взвешивали на аналитических весах Ohaus.

У каждой особи отбирали зрелые и неповрежденные листья и зерновки и тонко измельчали. Содержание азота в растительном материале определяли в трехкратной повторности тем же методом, что и в образцах почвы/биоугля. Содержание общего фосфора определяли спектрофотометрически после мокрого сжигания по Кельдалю.

Корневые системы отмывали от почвы водой и фиксировали в 70-процентном этиловом спирте. Порядок ветвления определяли для каждого корня в соответствии с центростремительной системой упорядочения, где порядки распределяются от дистальной части [13]. Корни на дистальном конце корневой системы – корни первого порядка – образуются на корнях второго порядка, которые закладываются на корнях третьего порядка.

Затем сегменты корней первого порядка разрезали поперечно на срезы толщиной 20–50 мкм и измеряли диаметр с помощью окулярного микрометра на микроскопе Leica DM 5000 (Leica, Германия) при 150-кратном увеличении.

Таблица 3

Морфометрические и химические характеристики растений *Triticum durum*, выращенных на почве без и с добавлением биоугля (среднее ± ошибка среднего)

Агротехнологии

| Показатели | Варианты опыта | |
|--|----------------|------------------|
| | Почва | Почва с биоуглем |
| Морфометрические характеристики надземных органов | | |
| Высота растения, см | 76,7 ± 1,1 a | 74,1 ± 2,4 a |
| Масса растения, г | 4,80 ± 0,22 a | 4,09 ± 0,17 b |
| Масса листьев, г | 0,34 ± 0,01 a | 0,34 ± 0,01 a |
| Масса зерновок, г | 1,70 ± 0,10 a | 1,39 ± 0,11 b |
| Масса стебля, г | 1,64 ± 0,18 a | 1,33 ± 0,10 a |
| Химические характеристики надземных органов | | |
| <i>Содержание в листьях</i> | | |
| Азот, % | 1,08 ± 0,08 a | 1,29 ± 0,12 a |
| Фосфор, мг/г | 12,6 ± 0,9 | 11,1 ± 0,7 |
| <i>Содержание в зерне</i> | | |
| Азот, % | 3,02 ± 0,04 | 2,98 ± 0,06 |
| Фосфор, мг/г | 12,6 ± 0,3 | 12,9 ± 0,4 |
| Морфометрические характеристики корневой системы | | |
| Масса корней, г | 1,13 ± 0,11 a | 1,00 ± 0,11 a |
| Доля корней в массе растения, % | 23,8 ± 2,6 a | 24,4 ± 2,1 a |
| Интенсивность микоризации, % | 22,7 ± 1,3 a | 32,0 ± 1,7 b |
| Встречаемость арбускул, % | 15,7 ± 1,5 a | 27,7 ± 2,0 b |
| Встречаемость везикул, % | 0,27 ± 0,27 a | 2,67 ± 0,94 b |
| Диаметр поглощающих корней, мкм | 142,4 ± 6,4 a | 138,8 ± 5,4 b |
| Порядок ветвления корней, шт. | 3 | 3–4 |

Примечание. Разные буквы указывают на различия между вариантами, значимые на уровне $p < 0,05$, одинаковые – на отсутствие различий.

Table 3

Morphometric and chemical characteristics of *Triticum durum* plants grown on soil without and with the addition of biochar (mean ± mean error)

| Indicator | Experience options | |
|---|--------------------|-------------------|
| | Soil | Soil with biochar |
| Morphometric characteristics of aboveground organs | | |
| Plant height, cm | 76.7 ± 1.1 a | 74.1 ± 2.4 a |
| Plant mass, g | 4.80 ± 0.22 a | 4.09 ± 0.17 b |
| Leaf mass, g | 0.34 ± 0.01 a | 0.34 ± 0.01 a |
| Grain mass, g | 1.70 ± 0.10 a | 1.39 ± 0.11 b |
| Stem mass, g | 1.64 ± 0.18 a | 1.33 ± 0.10 a |
| Chemical characteristics of aboveground organs | | |
| <i>Content in leaves</i> | | |
| Nitrogen, % | 1.08 ± 0.08 a | 1.29 ± 0.12 a |
| Phosphorus, mg/g | 12.6 ± 0.9 | 11.1 ± 0.7 |
| <i>Content in grains</i> | | |
| Nitrogen, % | 3.02 ± 0.04 | 2.98 ± 0.06 |
| Phosphorus, mg/g | 12.6 ± 0.3 | 12.9 ± 0.4 |
| Morphometric characteristics of the root system | | |
| Root mass, g | 1.13 ± 0.11 a | 1.00 ± 0.11 a |
| The proportion of roots in the mass of the plant, % | 23.8 ± 2.6 a | 24.4 ± 2.1 a |
| Mycorrhization intensity, % | 22.7 ± 1.3 a | 32.0 ± 1.7 b |
| Occurrence of arbuscules, % | 15.7 ± 1.5 a | 27.7 ± 2.0 b |
| Occurrence of vesicles, % | 0.27 ± 0.27 a | 2.67 ± 0.94 b |
| Diameter of absorbing roots, microns | 142.4 ± 6.4 a | 138.8 ± 5.4 b |
| The order of branching roots, pcs. | 3 | 3–4 |

Note. Different letters indicate differences between variants significant at the level of $p < 0.05$, the same letters – the absence of differences.

У каждой особи отбирали и фиксировали в 70-процентном спирте по одному образцу корневой системы. В каждом образце (у каждой особи) на 15 фрагментах тонких корней первого и второго порядков длиной по 1 см определяли микоризную колонизацию. Корни подвергали мацерации на водяной бане в КОН 30–60 мин. и окрашивали анилиновым синим [14]. На давленных препаратах при увеличении $\times 200$ регистрировали корневые волоски, гифы, арбускулы и везикулы грибов арбускулярной микоризы. Их присутствие определяли в 5 полях зрения микроскопа на каждом сантиметровом фрагменте корней общей длиной более 20 см. Таким образом, всего было 75 полей зрения для особи и 375 для каждого варианта эксперимента. Рассчитывали характеристики развития арбускулярной микоризы: интенсивность формирования или доля полей зрения с соответствующими структурами от общего числа полей зрения: а) арбускул, %; б) везикул, %; в) всех структур, %.

Достоверность различий между вариантами оценивали для количественных параметров, используя двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и критерий Тьюки; для признаков, измеренных в порядковой шкале, – критерий Манна – Уитни. В таблице и на графиках приведены средние значения со стандартной ошибкой.

Результаты (Results)

Агродерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва, используемая в эксперименте по выявлению влияния внесения биоугля на ее свойства и выращиваемую пшеницу (таблица 1), имеет благоприятную для произрастания растений объемную массу ($0,8 \text{ г/см}^3$), кислую реакцию среды ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 4,9$), высокое содержание органического углерода (около 7 %) и общего азота (0,5 %), а также высокую степень обеспеченности подвижными формами калия ($19 \text{ мг / 100 г почвы}$) и среднюю – подвижными формами фосфора ($8 \text{ мг / 100 г почвы}$).

Биоуголь, используемый в вегетационном опыте (см. таблицу 1), имеет в 3 раза меньшую по сравнению с почвой плотность твердой фазы, нейтральную реакцию среды, в среднем на 38 % состоит из углерода, обогащен азотом (0,22 %), содержит большое количество подвижных соединений калия (свыше $100 \text{ мг / 100 г почвы}$) и очень низкое – подвижных соединений фосфора (около $2 \text{ мг / 100 г почвы}$). Внесение биоугля в почву перед выращиванием пшеницы существенно изменило только один показатель – содержание общего органического углерода, которое возросло на 0,64 %.

Сопоставление физико-химических характеристик субстратов после выращивания пшеницы с целью выявления влияния биоугля (таблица 2) показало, что почва с внесенным биоуглем по сравнению с почвой без биоугля характеризуется большими значениями pH как водной, так и соле-

вой вытяжки (5,26 против 4,80 и 4,33 против 4,23 соответственно), более высоким содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ (7,21 % против 6,83 %), а также $\text{N}_{\text{общ}}$ (0,50 % против 0,46 %). В то же время содержание общего органического углерода в обоих вариантах снизилось до 6,83 в контроле и 7,21 – в эксперименте. Различия по значениям pH и содержанию общего азота и углерода значимы при $p < 0,01$. В то же время показатели объемной массы, плотности твердой фазы, содержания подвижных соединений K_2O и P_2O_5 в сравниваемых субстратах имеют близкие значения.

Анализ динамики исследуемых физико-химических показателей в эксперименте выявил (см. таб-лицу 2), что выращивание пшеницы привело в обоих вариантах субстрата к незначительному снижению объемной массы (на $0,2 \text{ г/см}^3$) и плотности твердой фазы (на $0,03\text{--}0,05 \text{ г/см}^3$), уменьшению содержания общего органического углерода (на $0,28\text{--}0,54 \%$), подвижных соединений калия (на $13\text{--}15 \text{ мг / 100 г почвы}$) и фосфора (менее $1 \text{ мг / 100 г почвы}$), а также к незначительному (менее чем на 0,1) увеличению потенциальной кислотности.

Внесение биоугля в почву с посевом пшеницы по сравнению с контролем существенно увеличило значения актуальной кислотности (в среднем на 0,32), а также содержание органического азота (в среднем на 0,05 %), в то же время оно привело к потерям органического углерода (в среднем 0,54 %).

Морфометрический анализ надземных органов пшеницы выявил (таблица 3), что внесение биоугля не повлияло на высоту пшеницы, массу листьев и массу корней и отрицательно сказалось на общей массе растения и массе зерновок: масса растения снизилась на 15 %, а зерновок – на 18 % по сравнению с контролем.

Внесение биоугля не оказало существенное влияние на содержание азота и фосфора в листьях и зерне пшеницы (таблица 3).

Морфометрический анализ подземных органов показал (см. таблицу 3), что при внесении биоугля повышаются разветвленность корневой системы и микоризация: в эксперименте число порядков ветвления корней возросло с 3 до 4, а интенсивность микоризации – на 29 %, встречаемость арбускул увеличилась на 80 %, а везикул – в 10 раз. Диаметр корня достоверно снизился в присутствии биоугля, а доля корней в общей биомассе не изменилась.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

В проведенном опыте внесение биоугля привело к изменениям свойств почвы – увеличению pH и содержания общего азота, а также снижению содержания общего органического углерода. Полученные результаты сопоставимы с данными других исследований [15; 16]. Снижение кислотности обусловлено тем, что при пиролизе сырья образуются щелочные вещества (карбонаты и оксиды), которые

нейтрализуют ионы водорода в почве, снижая ее кислотность [16]. Увеличение содержания общего азота в почве и pH в кислых почвах при внесении биоугля может благоприятно влиять на рост растений напрямую [5] или за счет косвенных эффектов [17; 18]. В нашем исследовании при внесении биоугля происходило достоверное увеличение содержания общего азота в почве в конце эксперимента. Это может быть связано с тем, что внесение биоугля часто приводит к изменению структуры бактериального сообщества, что сопровождается уменьшением выщелачивания азота и увеличением азот-фиксирующей активности [19–21]. В связи с этим внесение биоугля должно улучшать азотное питание растений, однако в проведенном эксперименте произошло достоверное снижение массы растений и зерновок. Увеличение содержания общего азота в почве не привело также к повышению содержания азота и тесно связанного с ним фосфора в листьях и зерне пшеницы. Это можно объяснить тем, что биоуголь может снижать доступность элементов минерального питания для поглощения корнями [22], поэтому повышение содержания макроэлементов в системе почва – биоуголь не во всех случаях положительно влияет на рост растений. В ряде работ показан нейтральный [23] или даже негативный эффект внесения биоугля на рост растений [4], который может быть связан с тем, что некоторые виды биоугля не только активно поглощают ионы питательных веществ, но и могут быть токсичны из-за содержания смол и маслянистых веществ [24].

Внесение биоугля оказало существенное влияние на потери общего органического углерода в почве, которые в 2 раза превысили таковые в контроле. Обнаруженная убыль органического углерода сопоставима с результатами инкубационного эксперимента [25], в котором в присутствии биоугля была обнаружена повышенная эмиссия углекислого газа, а также минерализация органического вещества почвы.

Внесение биоугля оказало сильное влияние на подземную сферу растений: увеличились разветвленность корневой системы, микоризация корней при достоверном снижении толщины поглощающих корней.

Изменения в морфологии корней и их микоризации могут служить важным индикатором изменений свойств почвы при внесении биоугля [26; 27]. В проведенном эксперименте внесение биоугля вызвало снижение диаметра поглощающих корней

и увеличение порядка ветвления корней, что хорошо согласуется с полученными ранее данными, характеризующими реакцию корней на дефицит элементов минерального питания [8–10]. При этом внесение биоугля способствовало увеличению микоризации корней. Эти изменения происходили в основном за счет увеличения встречаемости структур, ответственных за обмен метаболитами между растением и грибом, – арбускул, а также везикул. Известно, что реакция микоризообразования в присутствии биоугля во многом зависит от вида растения, типа биоугля и почвы, динамики pH почвы и подвижных фосфатов [28], доступности других элементов минерального питания [29] и микробиологической активности [30]. В целом же увеличение микоризации корней зачастую свидетельствует о низкой обеспеченности подвижными фосфатами [31].

Таким образом, внесение биоугля из березового опила изменило состояние почвы и растений. Несмотря на улучшение свойств агродерново-подзолистой почвы, проявившемся в снижении кислотности и увеличении содержания общего азота, растения пшеницы отреагировали на внесение биоугля снижением общей биомассы и массы зерна, проявляя при этом стабильность в высоте растений, массе листьев, стеблей, корней, а также в содержании азота и фосфора в листьях и зерне. При этом произошли существенные перестройки корневой системы пшеницы: уменьшился диаметр поглощающих корней, увеличились разветвленность и микоризация. Подобные изменения морфометрических характеристик растений могут свидетельствовать о снижении доступности питательных веществ в присутствии биоугля. Наши результаты получены при изучении одного типа биоугля, для подтверждения и обобщения данных необходимо оценить больше типов биоуглей.

Понимание процессов, связанных со способностью биоугля удерживать питательные вещества и влиять на их доступность для растений, необходимо для прогнозирования эффекта от внесения биоугля на эффективность использования питательных веществ и увеличение положительного влияния на выращивание сельскохозяйственных культур.

Полученные в работе результаты могут послужить для оценки возможностей использования биоугольных мелиорантов в почвах разных условий формирования.

Библиографический список

1. Кудеяров В. Н. Влияние удобрений и системы земледелия на секвестрацию углерода в почвах // Агротехнологии. 2022. № 12. С. 79–96. DOI: 10.31857/S0002188122120092.
2. Cornelissen G., Jubaedah, Nurida N. L., Hale S. E., Martinsen V., Silvani L., Mulder J. Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 634. Pp. 561–568. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.380.

3. Murtaza G., Ahmed Z., Usman M., Tariq W., Ullah Z., Shareef M., Iqbal H., Waqas M., Tariq A., Wu Y., Zhang Z., Ditta A. Biochar induced modifications in soil properties and its impacts on crop growth and production // *Journal of Plant Nutrition*. 2021. Vol. 44. Iss. 11. Pp. 1677–1691. DOI: 10.1080/01904167.2021.1871746.
4. Meschewski E., Holm N., Sharma B. K., Spokas K., Minalt N., Kelly J. J. Pyrolysis biochar has negligible effects on soil greenhouse gas production, microbial communities, plant germination, and initial seedling growth // *Chemosphere*. 2019. Vol. 228. Pp. 565–576. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.031.
5. Purakayastha T. J., Kumari S., Pathak H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues // *Geoderma*. 2015. Vol. 239–240. Pp. 293–303. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.11.009.
6. Mukherjee A., Zimmerman A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures // *Geoderma*. 2013. Vol. 193. Pp. 122–130. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.10.002.
7. Zhang Q., Song Y., Wu Z., Yan X., Gunina A., Kuzyakov Y., Xiong Z. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation // *Journal of Clean Production*. 2020. Vol. 242. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118435.
8. Craine J. M., Froehle J., Tilman D. G., Wedin D. A., Chapin I. F. S. The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients // *Oikos*. 2003. Vol. 93. Iss. 2. Pp. 274–285. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2001.930210.x.
9. Zhu J., Lynch J. P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays*) seedlings // *Functional Plant Biology*. 2004. Vol. 31 (10). Pp. 949–958. DOI: 10.1071/FP04046.
10. Bayuelo-Jiménez J. S., Gallardo-Valdéz M., Pérez-Decelis V. A., Magdaleno-Armas L., Ochoa I., Lynch J. P. Genotypic variation for root traits of maize (*Zea mays* L.) from the Purhepecha Plateau under contrasting phosphorus availability // *Field Crops Research*. 2011. Vol. 121 (3). Pp. 350–362. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.01.001.
11. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: изд-во МГУ, 1970. 488 с.
12. Воробьева Л. А. Теория и практика химического анализа почв. Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.
13. Pregitzer K. S., DeForest J. L., Burton A. J., Allen M. F., Ruess R. W., Hendrick R. L. Fine root architecture of nine north American trees // *Ecological Monographs*. 2002. Vol. 72. Iss. 2. Pp. 293–309. DOI: 10.1890/0012-9615(2002)072[0293:FRAONN]2.0.CO;2.
14. Селиванов И. А. Микосимбиотрофизм как форма консортивных связей в растительном покрове Советского Союза. Москва: Наука, 1981. 232 с.
15. Al-Wabel M. I., Hussain Q., Usman A. R. A., Ahmad M., Abduljabbar A., Sallam A. S., Ok Y. S. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: a review // *Land Degradation & Development*. 2018. Vol. 29. Iss. 7. Pp. 2124–2161. DOI: 10.1002/ldr.2829.
16. Пономарев К. О., Первушина А. Н., Коротаева К. С., Юртаев А. А., Петухов А. С., Табакаев Р. Б., Шаненков И. И. Влияние биоугля на развитие яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и кислотность дерново-подзолистой почвы в Западной Сибири // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2022. Вып. 113. С. 110–137. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-110-137.
17. Tesfaye F., Liu X., Zheng J., Cheng K., Bian R., Zhang X., Li L., Drosos M., Joseph S., Pan G. Could biochar amendment be a tool to improve soil availability and plant uptake of phosphorus? A meta-analysis of published experiments // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. No. 26. Pp. 34108–34120. DOI: 10.1007/s11356-021-14119-7.
18. Curaqueo G., Roldán A., Mutis A., Panichini M., Martín A. P.-S., Meier S., Mella R. Effects of biochar amendment on wheat production, mycorrhizal status, soil microbial community, and properties of an Andisol in Southern Chile // *Field Crops Research*. 2021. Vol 273 (1). Article number 108306. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108306.
19. Gorovtsov A. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Perelomov L. V., Soja G., Zamulina I. V., Rajput V. D., Sushkova S. N., Mohan D., Yao J. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil // *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. Vol. 42 (8). Pp. 2495–2518. DOI: 10.1007/s10653-019-00412-5.
20. Ahmad Z., Mosa A., Zhan L., Gao B. Biochar modulates mineral nitrogen dynamics in soil and terrestrial ecosystems: A critical review // *Chemosphere*. 2021. Vol. 278. Article number 130378. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130378.
21. Yin S., Suo F., Kong Q., You X., Zhang X., Yuan Y., Yu X., Cheng Y., Sun R., Zheng H., Zhang C., Li Y. Biochar enhanced growth and biological nitrogen fixation of wild soybean (*Glycine max* subsp. *Soja* Siebold & Zucc.) in a Coastal Soil of China // *Agriculture*. 2021. Vol. 11 (12). Article number 1246. DOI: 10.3390/agriculture11121246.
22. El-Naggar A., El-Naggar A. H., Shaheen S. M., Sarkar B., Chang S. X., Tsang D. C. W., Rinklebe J., Ok Y. S. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: a review // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 241. Pp. 458–467. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.044.

23. Alburquerque J. A., Salazar P., Barrón V., Torrent J., Campillo M. C., Gallardo A., Villar R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels // *Agronomy for Sustainable Development*. 2013. Vol. 33. Pp. 475–484. DOI: 10.1007/s13593-012-0128-3.
24. Godlewska P., Ok Y. S., Oleszczuk P. The dark side of black gold: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 403. Article number 123833. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123833.
25. Ling L., Luo Y., Jiang B., Lv J., Meng C., Liao Y., Reid B., Ding F., Lu Z., Kuzyakov Y., Xu J. Biochar induces mineralization of soil recalcitrant components by activation of biochar responsive bacteria groups // *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 172. Article number 108778. DOI: 10.1016/j.soilbio.2022.108778.
26. Olmo M., Villar R., Salazar P., Alburquerque J. A. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development // *Plant and Soil*. 2016. Vol. 399. Pp. 333–343. DOI: 10.1007/s11104-015-2700-5.
27. Shen Q., Hedley M., Arbestain M. C., Kirschbaum M. U. F. Can biochar increase the bioavailability of phosphorus? // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016. Vol. 16. No 2. Pp. 268–286. DOI: 10.4067/S0718-95162016005000022.
28. Solaiman Z. M., Abbott L. K., Murphy D. V. Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9 (1). Article number 5062. DOI: 10.1038/s41598-019-41671-7.
29. Hammer E. C., Balogh-Brunstad Z., Jakobsen I., Olsson P. A., Stipp S. L. S., Rillig M. C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. Vol. 77. Pp. 252–260. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.06.012.
30. Yang X., Ran Z., Li R., Fang L., Zhou J., Guo L. Effects of biochar on the growth, ginsenoside content, and soil microbial community composition of *Panax quinquefolium* L. // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2022. Vol. 22 (2). Pp. 2670–2686. DOI: 10.1007/s42729-022-00835-7.
31. Смит С. Э., Рид Д. Дж. Микоризный симбиоз / Пер. с англ. 3-е издание. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 776 с.

Об авторах:

Анна Анатольевна Бетехтина, кандидат биологических наук, доцент Департамента наук о Земле и космосе, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-5388-6007, AuthorID 132664. *E-mail: A.A.Betekhtina@urfu.ru*

Ольга Анатольевна Некрасова, кандидат биологических наук, доцент Департамента наук о Земле и космосе, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-3260-6440, AuthorID 155905. *E-mail: o_nekr@mail.ru*

Алина Васильевна Малахеева, аспирант Департамента наук о Земле и космосе, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0009-0002-0056-1054, AuthorID 1195211. *E-mail: alina.malakheeva@gmail.com*

Семен Александрович Черепанов, аспирант Департамента наук о Земле и космосе, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0009-0007-4727-4462, AuthorID 1208782. *E-mail: sema.cherepanov.90@mail.ru*

Виктор Владимирович Валдайских, кандидат биологических наук, директор ботанического сада, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-9440-8522, AuthorID 142640. *E-mail: v_vald@mail.ru*

References

1. Kudayarov V. N. Influence of fertilizers and farming systems on carbon sequestration in soils. *Eurasian Soil Science*. 2022; 12: 79–96. DOI: 10.31857/S0002188122120092. (In Russ.)
2. Cornelissen G., Jubaedah, Nurida N. L., Hale S. E., Martinsen V., Silvani L., Mulder J. Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol. *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 634. Pp. 561–568. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.380.
3. Murtaza G., Ahmed Z., Usman M., Tariq W., Ullah Z., Shareef M., Iqbal H., Waqas M., Tariq A., Wu Y., Zhang Z., Ditta A. Biochar induced modifications in soil properties and its impacts on crop growth and production. *Journal of Plant Nutrition*. 2021; 44 (11): 1677–1691. DOI: 10.1080/01904167.2021.1871746.
4. Meschewski E., Holm N., Sharma B. K., Spokas K., Minalt N., Kelly J. J. Pyrolysis biochar has negligible effects on soil greenhouse gas production, microbial communities, plant germination, and initial seedling growth. *Chemosphere*. 2019; 228: 565–576. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.031.

5. Purakayastha T. J., Kumari S., Pathak H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. *Geoderma*. 2015; 239–240: 293–303. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.11.009.
6. Mukherjee A., Zimmerman A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma*. 2013; 193: 122–130. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.10.002.
7. Zhang Q., Song Y., Wu Z., Yan X., Gunina A., Kuzyakov Y., Xiong Z. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Clean Production*. 2020; 242. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118435.
8. Craine J. M., Froehle J., Tilman D. G., Wedin D. A., Chapin I. F. S. The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients. *Oikos*. 2003; 93 (2): 274–285. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2001.930210.x.
9. Zhu J., Lynch J. P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays*) seedlings. *Functional Plant Biology*. 2004; 31 (10): 949–958. DOI: 10.1071/FP04046.
10. Bayuelo-Jiménez J. S., Gallardo-Valdéz M., Pérez-Decelis V. A., Magdaleno-Armas L., Ochoa I., Lynch J. P. Genotypic variation for root traits of maize (*Zea mays* L.) from the Purhepecha Plateau under contrasting phosphorus availability. *Field Crops Research*. 2011; 121 (3): 350–362. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.01.001.
11. Arinushkina E. V. Guidelines for Chemical Soil Analysis. Moscow: Publishing House of MSU, 1970. 488 p. (In Russ.)
12. Vorob'eva L. A. Theory and practice of chemical analysis of soils. Moscow: GEOS, 2006. 400 p. (In Russ.)
13. Pregitzer K. S., DeForest J. L., Burton A. J., Allen M. F., Ruess R. W., Hendrick R. L. Fine root architecture of nine north American trees. *Ecological Monographs*. 2002; 72 (2): 293–309. DOI: 10.1890/0012-9615(2002)072[0293:FRAONN]2.0.CO;2.
14. Selivanov I. A. Myco-Symbiotrophism as a form of consortconnections in the vegetation cover of the Soviet Union. Moscow: Science, 1981. 232 p. (In Russ.)
15. Al-Wabel M. I., Hussain Q., Usman A. R. A., Ahmad M., Abduljabbar A., Sallam A. S., Ok Y. S. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: a review. *Land Degradation & Development*. 2018; 29 (7): 2124–2161. DOI: 10.1002/ldr.2829.
16. Ponomarev K. O., Pervushina A. N., Korotaeva K. S., Yurtaev A. A., Petuhov A. S., Tabakaev R. B., Shanenkov I. I. Biochar influence on the development of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) and acidity of soddy-podzolic soil in Western Siberia. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2022; 113: 110–137. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-110-137. (In Russ.)
17. Tesfaye F., Liu X., Zheng J., Cheng K., Bian R., Zhang X., Li L., Drosos M., Joseph S., Pan G. Could biochar amendment be a tool to improve soil availability and plant uptake of phosphorus? A meta-analysis of published experiments. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021; 28 (26): 34108–34120. DOI: 10.1007/s11356-021-14119-7.
18. Curaqueo G., Roldán A., Mutis A., Panichini M., Martín A. P.-S., Meier S., Mella R. Effects of biochar amendment on wheat production, mycorrhizal status, soil microbial community, and properties of an Andisol in Southern Chile. *Field Crops Research*. 2021; 273 (1): 108306. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108306.
19. Gorovtsov A. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Perelomov L. V., Soja G., Zamulina I. V., Rajput V. D., Sushkova S. N., Mohan D., Yao J. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020; 42 (8): 2495–2518. DOI: 10.1007/s10653-019-00412-5.
20. Ahmad Z., Mosa A., Zhan L., Gao B. Biochar modulates mineral nitrogen dynamics in soil and terrestrial ecosystems: A critical review. *Chemosphere*. 2021; 278: 130378. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130378.
21. Yin S., Suo F., Kong Q., You X., Zhang X., Yuan Y., Yu X., Cheng Y., Sun R., Zheng H., Zhang C., Li Y. Biochar enhanced growth and biological nitrogen fixation of wild soybean (*Glycine max* subsp. *Soja* Siebold & Zucc.) in a Coastal Soil of China. *Agriculture*. 2021; 11 (12): 1246. DOI: 10.3390/agriculture11121246.
22. El-Naggar A., El-Naggar A. H., Shaheen S. M., Sarkar B., Chang S. X., Tsang D. C. W., Rinklebe J., Ok Y. S. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: a review. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 241. Pp. 458–467. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.044.
23. Alburquerque J. A., Salazar P., Barrón V., Torrent J., Campillo M. C., Gallardo A., Villar R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development*. 2013; 33: 475–484. DOI: 10.1007/s13593-012-0128-3.
24. Godlewska P., Ok Y. S., Oleszczuk P. The dark side of black gold: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 403. Article number 123833. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123833.

25. Ling L., Luo Y., Jiang B., Lv J., Meng C., Liao Y., Reid B., Ding F., Lu Z., Kuzyakov Y., Xu J. Biochar induces mineralization of soil recalcitrant components by activation of biochar responsive bacteria groups. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022; 172: 108778. DOI: 10.1016/j.soilbio.2022.108778.

26. Olmo M., Villar R., Salazar P., Albuquerque J. A. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. *Plant and Soil*. 2016; 399: 333–343. DOI: 10.1007/s11104-015-2700-5.

27. Shen Q., Hedley M., Arbestain M. C., Kirschbaum M. U. F. Can biochar increase the bioavailability of phosphorus? *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016; 16 (2): 268–286. DOI: 10.4067/S0718-95162016005000022.

28. Solaiman Z. M., Abbott L. K., Murphy D. V. Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling. *Scientific Reports*. 2019; 9 (1): 5062. DOI: 10.1038/s41598-019-41671-7.

29. Hammer E. C., Balogh-Brunstad Z., Jakobsen I., Olsson P. A., Stipp S. L. S., Rillig M. C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology and Biochemistry*. 2014; 77: 252–260. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.06.012.

30. Yang X., Ran Z., Li R., Fang L., Zhou J., Guo L. Effects of biochar on the growth, ginsenoside content, and soil microbial community composition of *Panax quinquefolium* L. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2022; 22 (2): 2670–2686. DOI: 10.1007/s42729-022-00835-7.

31. Smit S. E., Rid D. Dzh. Mycorrhizal symbiosis / Translate from English. Edition 3rd. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2012. 776 p. (In Russ.)

Authors' information:

Anna A. Betekhtina, candidate of biological sciences, associate professor of the Department of Earth and space sciences, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-5388-6007, AuthorID 132664. *E-mail: A.A.Betekhtina@urfu.ru*

Olga A. Nekrasova, candidate of biological sciences, associate professor of the Department of Earth and space sciences, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-3260-6440, AuthorID 155905. *E-mail: o_nekr@mail.ru*

Alina V. Malakheeva, graduate student of the Department of Earth and space sciences, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0009-0002-0056-1054, AuthorID 1195211. *E-mail: alina.malakheeva@gmail.com*

Semen A. Cherepanov, graduate student of the Department of Earth and space sciences, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0009-0007-4727-4462, AuthorID 1208782. *E-mail: sema.cherepanov.90@mail.ru*

Viktor V. Valdyskikh, candidate of biological sciences, Director of the UrFU Botanical Garden, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0001-9440-8522, AuthorID 142640. *E-mail: v_vald@mail.ru*