

АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 631.8 (571.63)
doi: 10.17223/19988591/61/1

Влияние внесения биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур

Мария Александровна Бовсун¹, Ольга Владимировна Нестерова²,
Виктория Андреевна Семаль³, Николай Андреевич Сакара⁴,
Анастасия Владимировна Брикманс⁵, Татьяна Юрьевна Карпенко⁶,
Татьяна Сергеевна Тарасова⁷

^{1, 2, 3, 5, 6} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

³ Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты
Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

^{4, 7} Приморская овощная опытная станция – филиал
Федерального государственного научного учреждения «Федеральный научный
центр овощеводства», Артём, Россия

⁶ Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

¹ bovsun.mal@dyfu.ru

² nesterova.ov@dyfu.ru

³ semal.va@dyfu.ru

⁴ nsakara@inbox.ru

⁵ brikmans.av@dyfu.ru

⁶ karpenko.tiu@dyfu.ru

⁷ nsakara@inbox.ru

Аннотация. Биоуголь имеет широкий диапазон применения и множество положительных свойств. Одним из свойств биоугля является его способность влиять на урожайность растений. В работе оценено влияние внесения биоугля из древесных остатков *Betula alba* и его сочетания с минеральными и органическими удобрениями на урожайность сельскохозяйственных культур. Исследование проводилось на агрономогумусовых подбелах юга Приморского края. В качестве экспериментальной площадки было выбрано два поля. На поле № 1 действие внесенного биоугля на урожайность оценивалось в течение двух периодов вегетации на капусте белокочанной и сое в 2018 и 2019 гг. соответственно. На поле № 2 оценивалось влияние биоугля на урожайность столовой свеклы в течение одного периода вегетации 2020 г. Варианты опыта включали контроль, 1 кг/м² биоугля, 3 кг/м² биоугля и сочетания каждого из этих участков с минеральными (300 кг/га N₅₀P₁₂₅K₁₂₅) и органическими (10 т/га) удобрениями. Урожайность измерялась взвешиванием каждого растения с разделением на вилоч, покровные листья и корень для капусты, с разделением на корнеплод и ботву для свеклы и биомассой с квадратного метра сои. Показано, что наибольший прирост урожайности получен для капусты, где внесение только биоугля привело к увеличению урожайности на 111% в дозе 1 кг/м² и на 205% по сравнению с контролем в дозе 3 кг/м². Влияние биоугля на урожайность свеклы показало положительный, но менее выраженный результат по сравнению с влиянием биоугля на урожайность капусты. Влияние биоугля на биомассу сои статистически

отсутствовало. Выявлено, что биоуголь увеличил биомассу зеленой части сои и уменьшил количество бобов. Сделан вывод, что влияние биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур носит неоднозначный характер и связан с выбором сельскохозяйственной культуры. Внесение биоугля приводит к увеличению зеленой части растений.

Ключевые слова: биоуголь, сельское хозяйство, низкоуглеродные технологии, темногумусовые подбелы, Luvic Anthrosols, Дальний Восток

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 19-29-05166 и проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FZNS-2023-0019.

Для цитирования: Бовсун М.А., Нестерова О.В., Семаль В.А., Сакара Н.А., Брикманс А.В., Карпенко Т.Ю., Тарасова Т.С. Влияние внесения биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2023. № 61. С. 6–26. doi: 10.17223/19988591/61/1

Original article

doi: 10.17223/19988591/61/1

The effect of applying biochar on crop yields

Maria A. Bovsun¹, Olga V. Nesterova², Viktoriia A. Semal³, Nikolay A. Sakara⁴,
Anastasia V. Brikmans⁵, Tatiana Yu. Karpenko⁶, Tatiana S. Tarasova⁷

^{1, 2, 3, 5, 6} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

³ Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity,

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

^{4, 7} Seaside Vegetable Experimental Station of the All-Russian Scientific Research Institute
of Vegetables, Artyom, Russia

⁶ Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia

¹ bovsun.mal@dvfu.ru

² nesterova.ov@dvfu.ru

³ semal.va@dvfu.ru

⁴ nsakara@inbox.ru

⁵ brikmans.av@dvfu.ru

⁶ karpenko.tiu@dvfu.ru

⁷ nsakara@inbox.ru

Summary. Soil fertility is traditionally restored by applying organic and mineral fertilizers. The actual ways to solve the problem of soil fertility losses is the use of biochar. Biochar affects the water-air properties of the soil, pH, availability of nutrients, availability of organic carbon, structural and aggregate state of soils, reduces the amount of pollutants, sequesters carbon. One of the reasons for the use of biochar in agriculture is its ability to increase crop yields. The novelty of the research is the use of biochar in the soil and climatic conditions of the south of Primorsky Krai (Far East of Russia). The purpose of this research is to assess the effect of doses of biochar application, as well as its combined use with organic and mineral fertilizers on crop yields on Luvic Anthrosols in the south of Primorsky Krai. The experiment was conducted at the Primorsky Vegetable Experimental Station, a branch of the Federal State Scientific Institution "Federal Scientific Center of Vegetable Growing" (43°25'22.4"N 132°18'50.6"E, Surazhevka village, Primorsky Krai, Russian Federation). The increase in crop yields during the growing seasons of 2018, 2019 and 2020 was estimat-

ed. Two fields (field № 1 and field № 2) have been selected on the territory of the experimental one. The biochar was added to field № 1 on June 15, 2018. The biochar was added to field № 2 on June 19, 2020. 9 plots with an area of 21.6 m² (1.8 × 12 m) were selected in the fields (See Fig. 1): Control – a plot without the introduction of biochar and fertilizers, BC1kg – a plot with the introduction of 1 kg/m² of biochar, BC3kg – a plot with the introduction of 3 kg/m² of biochar, Min – a plot with the introduction of mineral fertilizers at a dose of 300 kg/ha N₅₀P₁₂₅K₁₂₅, MinBC1kg – a plot with the application of mineral fertilizers together with 1 kg/m² of biochar, MinBC3kg – a plot with the application of mineral fertilizers together with 3 kg/m² of biochar, Org – a plot with the application of organic fertilizer "Gigantin" at a dose of 10 t/ha, OrgBC1kg – a plot with the introduction of organic fertilizer together with 1 kg/m² of biochar, OrgBC3kg – a plot with the introduction of organic fertilizer together with 3 kg/m² of biochar. Biochar is made from *Betula alba* birch by slow pyrolysis. The properties of biochar were determined before its application in the vegetation experiment according to the international standard IBI (International Biochar Initiative). Biochar does not contain in its composition the maximum permissible concentrations of hazardous chemical elements, has a high-strength (H/C = 0.052 and O/C = 0.145) and highly porous structure (pore surface area 73.25 m²/g). The carbon content in the studied biochar is 78.13%, the pH is 8.09±0.07, the water absorption capacity in the original fraction is 110% ± 6.56%. Cabbage was grown in field № 1 in 2018. The cabbage was planted on June 15, 2018. The harvest was carried out on November 2–3, 2018 by weighing each plant with separation into root, cover leaves and forks. Soybeans were grown in field № 1 in 2019. The planting of soybeans was carried out on June 28, 2019. Soybean harvesting was carried out from October 10 to October 12, 2019. During the growing season of 2020, beets were grown on field № 2, the planting of the crop was carried out on July 10. The harvest was carried out in the third decade of October 2020. The soil in the studied areas is classified as Luvic Anthrosols and has a medium loamy granulometric composition (in Russian classification), silt loam by classification FAO. Soils have pH_{H2O} = 6.8, pH_{KCl} = 5.45.

As a result of the study, it was shown that biochar increases the biomass of cabbage (See Table 1). In the range of Control, BC1kg and BC3kg, the introduction of biochar significantly increased the yield of cabbage ($P = 0.001$). The Control had the lowest value of cabbage biomass (10.84 t/ha). At the BC1kg, the biomass increased by 111% compared to the control. The increase in biomass at the BC3kg was 205% compared to the control. In the ranks of Min, MinBC1kg and MinBC3kg and Org, OrgBC1kg and OrgBC3kg, a similar increase in cabbage biomass was observed ($P = 1.9 \cdot 10^{-7}$ and $9.6 \cdot 10^{-10}$, respectively). The largest increase in cabbage biomass was recorded at the MinBC3kg - 415% compared to the control and 53% compared to the Min. The head : cover leaves : root ratio showed that the Control has the lowest percentage of cabbage head biomass and the highest percentage of cover leaves biomass (35 : 42 : 22). The introduction of biochar increases the percentage of biomass of the cabbage head. So at the BC1kg, the ratio of head : cover leaves : root was 51 : 29 : 19. At the BC3kg, the ratio of head : cover leaves : root was 54:27:18. No effect of biochar on soybean biomass was revealed when comparing Control, BC1kg, BC3kg plots ($P = 0.99$) (See Table 2). No effect of biochar together with mineral and organic fertilizers on biomass was revealed when comparing the variants of the experiment Min, MinB1kg and MinB3kg ($P = 0.98$) and Org, OrgB1kg and OrgB3kg ($P = 0.96$). In all variants of the experiment, a decrease in soybean biomass in comparison with the control was noted. A comparison of the results of the biomass of one soybean plant, the average number of beans in the bush and the average height of the bush showed that biochar contributes to a decrease in the number of soybeans in the bush and an increase in the green biomass of soybeans. The results of measurements of beet biomass showed an increase in its biomass when using biochar (See Table 3). There was no significant difference in beet biomass between plots with different doses

of biochar. The calculation of the percentage of beetroot biomass from the total beet biomass showed a decrease in root biomass in case with biochar applying. Similarly, to the change in the percentage of root biomass to total beet biomass, the percentage of green part biomass to total beet biomass increased or decreased.

The results of the measurement showed that degree of biochar's influence on crop yields is controversial and is mainly related to the choice of crop. When considering the effect of biochar on the yield of white cabbage, soybean and beet, it was found out that biochar has a better effect on the biomass of the green part of the plant. The best results are discovering in the case of the influence of biochar on the yield of white cabbage were obtained, which is associated with the formation of the main part of the plant from green biomass. In the plot with 1 kg/m² of biochar, an increase in the total biomass of cabbage two times compared to the control was observed. In the plot with 3 kg/m² of biochar, an increase in the total biomass of cabbage three times compared to the control was observed. The effect of biochar on the yield of beets had a positive, but less pronounced result compared to the effect of biochar on the cabbage yield. In areas without organic and mineral fertilizers the largest increase in beet biomass when 1 kg/m² of biochar was added (86%) compared to the control was obtained. The effect of applying 3 kg/m² of biochar did not have a better result on beet yield compared to the effect of 1 kg/m² of biochar. The application of biochar demonstrate the percentage reduce of root crop biomass and increased the percentage of green part biomass in relation to the total beet biomass in the variants with biochar application and in variants with mineral fertilizers, but not in the variants with organic fertilizers. The application of biochar did not have a significant positive effect on soybean yield. It was revealed that biochar increased the biomass of the green part of soybeans and reduced the number of beans.

The paper contains 2 Figures, 3 Tables, and 30 References.

Keywords: biochar, agriculture, low-carbon technologies, Luvic Anthrosols, Far East of Russia

Funding: The work was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research under project № 19-29-05166 and the project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № FZNS-2023-0019.

For citation: Bovsun MA, Nesterova OV, Semal VA, Sakara NA, Brikmans AV, Karpenko TYu, Tarasova TS. The effect of applying biochar on crop yields. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2023;61:6-26. doi: 10.17223/19988591/61/1

Введение

Сохранение почвенного плодородия является одной из важнейших задач при возникновении частной собственности на землю. Земельное законодательство дает возможность собственнику самостоятельно принимать решения о выборе производимых сельскохозяйственных культур, способах обработки почвы и сохранения ее плодородия. Формирование нового рынка органической продукции заставляет собственников искать новые виды удобрений, которые могли бы повышать урожайность и сохранять готовый продукт как органический.

Производство овощной сельскохозяйственной продукции предполагает активную механическую обработку гумусового горизонта, а значит, это может приводить к постепенной потере почвенного плодородия за счет изменения водно-воздушного режима в прикорневой зоне.

Традиционным способом восстановления почвенного плодородия в сельском хозяйстве для выращивания культур является внесение органических, минеральных удобрений и их сочетаний. Почвы тяжелого гранулометрического состава, находящиеся под воздействием умеренного муссонного климата Приморского края, имеют проблему избыточного переувлажнения в прикорневой зоне, вызванного обильным количеством осадков, что негативно сказывается на росте и развитии растений. Внесение мелиорантов совместно с разными типами удобрений, вероятно, может решить эту проблему. Одним из актуальных путей решения проблемы и перспективным видом мелиоранта является биоуголь. На сегодняшний день активное использование биоугля обусловлено не только множеством его положительных для плодородия почв свойств, но также и способностью уменьшать выбросы парниковых газов.

Согласно Мандату качества биоугля (Biochar Quality Mandate – BQM), который разработан Эдинбургским университетом в 2013 г., биоуголь (англ. «biochar») – это твердый материал, содержащий углерод с большим количеством трудноминерализуемых ароматических структур, полученный путем карбонизации возобновляемой органической биомассы при высокой температуре без доступа кислорода (пиролиза) [1].

Биоуголь имеет широкий диапазон применения. В сельском хозяйстве биоуголь применяется в качестве средства для улучшения качества свойств и плодородия почв. Он влияет на такие параметры, как водно-воздушные свойства почвы, значения pH почвенного раствора, доступность питательных веществ, доступность органического углерода, структурно-агрегатное состояние почв, уменьшает количество загрязняющих веществ, секвестрирует углерод и снижает эмиссию парниковых газов [2–7]. Одним из основных критериев эффективности работы биоугля является влияние на прирост урожайности растений [8–10]. Прирост урожайности за счет внесения биоугля может варьировать в широком диапазоне от незначительного прироста в несколько процентов до почти двойного. Хорошее влияние биоугля на прирост урожая отмечается для пропашных и зерновых культур. Увеличение урожайности ячменя на 61% в среднеокультуренной почве и на 49% в высокоокультуренной почве по сравнению с контролем показано в исследовании И.М. Мухиной с соавт. [8]. Увеличение урожайности кукурузы и пшеницы на 28 и 13% соответственно по сравнению с контролем выявлено в исследовании Салара Ф. Абриза с соавт. [9]. Внесение 2 и 4% биоугля увеличило урожайность перестощетинника пурпурного (*Pennisetum Purpureum Schumacher*) на 6 и 82% соответственно по сравнению с контролем [10].

Несмотря на большое количество научных публикаций, подтверждающих увеличение урожайности за счет внесения биоугля, существует ряд работ, где получены неоднозначные и даже отрицательные эффекты, наблюдаемые в почвах от внесения этого продукта [11, 12].

В мировой практике использование биоугля для улучшения качества почв приобрело особую популярность в последние два десятилетия.

За этот период опубликовано большое количество научных исследований по влиянию биоугля на широкий диапазон почвенных свойств в разнообразных почвенно-климатических условиях [13–16]. Тем не менее прогнозирование действия биоугля на почвы и урожайность в определенном сочетании внешних условий остается сложным.

Новизной работы является применение биоугля в почвенно-климатических условиях юга Приморского края.

Цель работы – оценка влияния различных доз внесения биоугля, а также его совместного применения с органическими и минеральными удобрениями на урожайность сельскохозяйственных культур на агрономическом участке юга Приморского края.

Материалы и методики исследования

Оценка влияния биоугля и его совместного применения с минеральными и органическими удобрениями на урожайность сельскохозяйственных культур проведена в условиях вегетационного опыта на базе Приморской овощной опытной станции – филиала Федерального государственного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (43°25'22.4"N 132°18'50.6"E, с. Суражевка, Приморский край, Российская Федерация). Оценка влияния биоугля на прирост урожая сельскохозяйственных культур проводилась в вегетационные периоды 2018, 2019 и 2020 гг. На территории опытной станции использовались два сопоставимых по рельефу и свойствам почв поля (поле № 1 и поле № 2), на которых в разные временные периоды был внесен биоуголь. На полях выделили по 9 участков площадью 21,6 м² (1,8 × 12 м), которые включали следующие варианты опыта (рис. 1): Контроль [Control] – участок без внесения биоугля и удобрений, Б1кг [BC1kg] – участок с внесением 1 кг/м² биоугля, Б3кг [BC3kg] – участок с внесением 3 кг/м² биоугля, Мин [Min] – участок с внесением минеральных удобрений в дозе 300 кг/га N₅₀P₁₂₅K₁₂₅, МинБ1кг [MinBC1kg] – участок с внесением минеральных удобрений совместно с 1 кг/м² биоугля, МинБ3кг [MinBC3kg] – участок с внесением минеральных удобрений совместно с 3 кг/м² биоугля, Орг [Org] – участок с внесением органического удобрения «Гигантин» в дозе 10 т/га, ОргБ1кг [OrgBC1kg] – участок с внесением органического удобрения совместно с 1 кг/м² биоугля, ОргБ3кг [OrgBC3kg] – участок с внесением органического удобрения совместно с 3 кг/м² биоугля.

В исследовании применялся биоуголь, произведенный из древесных остатков березы *Betula alba* методом медленного пиролиза в температурном диапазоне от 360 до 380°C. Свойства биоугля определялись до его применения в вегетационном опыте согласно международному стандарту IBI (International Biochar Initiative) [17]. Используемый биоуголь является экологически безопасным, так как не содержит в своем составе предельно допустимых концентраций опасных химических элементов, имеет высокопрочную (Н/С = 0,052 и О/С = 0,145) и высокопористую структуру (пло-

щадь поверхности пор 73,25 м²/г). Содержание углерода в исследуемом биоугле составляет 78,13%, рН_{H2O} составляет 8,09 ± 0,07, водопоглощающая способность в оригинальной фракции составляет 110% ± 6,56% [18].

	Орг [Org]	ОргБ1кг [OrgBC1kg]	ОргБ3кг [OrgBC3kg]
	Мин [Min]	МинБ1кг [MinBC1kg]	МинБ3кг [MinBC3kg]
1,8 м	Контроль [Control]	Б1кг [BC1kg]	Б3кг [BC3kg]
12 м			

Рис. 1. Схема вегетационного опыта
[Fig. 1. Scheme of vegetation experience]

На поле № 1 биоуголь вносился 15 июня 2018 г. в дозах, соответствующих схеме опыта (1 и 3 кг/м²). Так, в 2019 г. рассматривалось влияние биоугля на урожайность во второй вегетационный период после внесения. На поле № 2 биоуголь вносился 19 июня 2020 г. в дозах, соответствующих схеме опыта (1 и 3 кг/м²).

Одними из основных сельскохозяйственных культур, выращиваемых на территории Приморского края, являются соя, свекла и капуста, влияние на урожайность которых представлено в данном исследовании. На территории Приморской овощной опытной станции – филиала Федерального государственного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства», данные культуры включены в овощно-картофельный севооборот: капуста белокочанная, овес и соя на сидерат, картофель, столовая свекла, морковь, что обуславливает выбор данных культур.

В течение вегетационного периода 2018 г. на поле № 1 выращивалась капуста белокочанная сорта «Прибрежная». Высадка культуры осуществлялась 15 июня 2018 г. Сбор урожая производился вручную 2–3 ноября 2018 г. путем взвешивания каждого растения с разделением на корень, покровные листья и вилок. В течение вегетационного периода 2019 г. на поле № 1 выращивалась соя. Высадка соевых бобов производилась 28 июня 2019 г. Уборка сои проводилась с 10 по 12 октября 2019 г. После оценки урожайности соя использовалась в качестве сидерата для обогащения почвы азотом. В течение вегетационного периода 2020 г. на поле № 2 выращивалась свекла сорта «Бордо», высадка культуры осуществлялась 10 июля. Сбор урожая производился в третьей декаде октября 2020 г. Почва на исследуемых участках классифицируется как агропеломусовый подбел по классификации почв России [19] (Luvic Anthrosols по международной классификации FAO). Гранулометрический состав пахотного горизонта почвы (0–20 см) до использования в вегетационном опыте классифицировался как суглинок средний, рН_{H2O} – 6,8, рН_{KCl} – 5,45 [18].

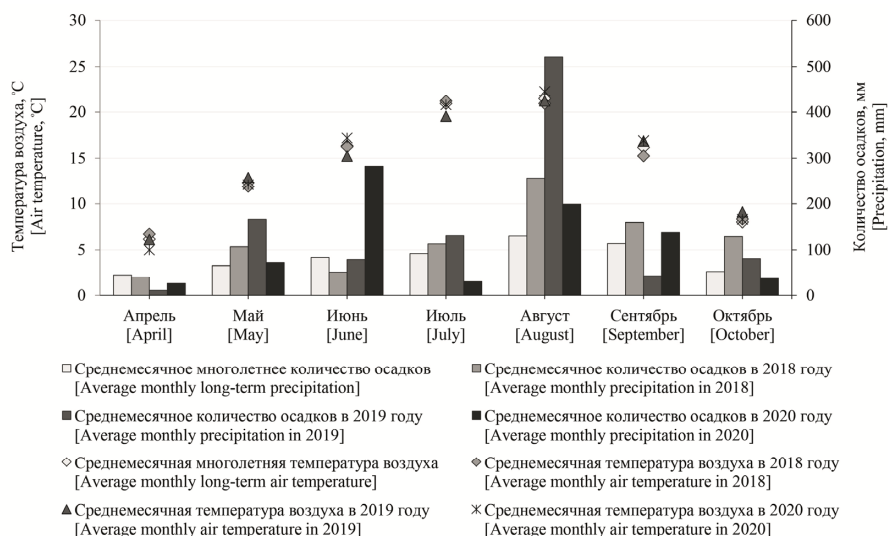


Рис. 2. Температура воздуха и количество осадков в течение вегетационных периодов 2018–2020 годов на территории опытной станции (по данным м/с «Садгород», аэропорта «Владивосток» им. В.К. Арсеньева, <http://rp5.ru>, дата обращения: 02.07.2022)
[Fig. 2. Air temperature and precipitation during the growing season of 2018 - 2020 on the territory of the experimental station of Primorsky Krai (according to the m/s "Sadgorod", Vladivostok airport named after V.K. Arsenyev, <http://rp5.ru>, access date: 02.07.2022)]

Климат территории проведения полевого опыта характеризуется как умеренный муссонный с чертами континентального. По количеству выпавших осадков рассматриваемые вегетационные периоды 2018–2020 гг. характеризуются как нетипично влажные (см. рис. 2). Общее количество осадков за период с апреля по октябрь 2018 г. составило 856,6 мм, что выше общего среднемесячного многолетнего значения за аналогичный период на 272,6 мм. Общее количество осадков за период с апреля по октябрь 2019 г. составило 1 032 мм, что выше общего среднемесячного многолетнего значения за аналогичный период на 448 мм. Общее количество осадков за период с апреля по октябрь 2020 г. составило 786 мм, что выше общего среднемесячного многолетнего значения за аналогичный период на 202 мм. Наибольшее количество осадков за вегетационные периоды 2018 и 2019 гг. выпадало в августе, где превышение среднемесячного многолетнего значения составило 126,6 и 391 мм, соответственно. За вегетационный период 2020 г. наибольшее количество осадков выпало в июне – 283 мм. Среднемесячные значения температуры воздуха за вегетационные периоды 2018–2020 гг. несущественно отличались от среднемесячных многолетних значений.

Данные по урожайности представлены как среднее арифметическое с доверительным интервалом в виде стандартной ошибки. Для сравнения анализируемых параметров использовался однофакторный дисперсионный анализ ANOVA. Значимость между вариантами опыта ($P < 0,05$) оценена попарно с использованием критерия Стьюдента–Ньюмана–Кеулса.

Результаты исследования и обсуждение

Проведенная оценка влияния биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур в данном исследовании показала разницу результатов в зависимости от выращиваемой культуры и варианта опыта.

Положительный эффект от внесения биоугля на поле № 1 в 2018 г. в первый вегетационный период действия биоугля, с 0-й по 4-й месяцы его нахождения в почве, получен при выращивании капусты белокочанной сорта «Прибрежная». Биомасса капусты оценивалась с учетом суммы биомассы корней, листьев и плодовой части капусты (табл. 1). Сравнение участков Контроль, Б1кг и Б3кг показало, что внесение биоугля достоверно увеличивает урожайность капусты ($P = 0,001$). Контрольный участок имел наименьшее значение биомассы капусты (10,84 т/га). На участке Б1кг биомасса увеличилась на 111% по сравнению с контролем. Прирост биомассы на участке Б3кг составил 205% по сравнению с контролем.

При сравнении участков Мин, МинБ1кг и МинБ3кг, а также Орг, ОргБ1кг и ОргБ3кг наблюдалась аналогичная достоверная ($P = 1,9 \times 10^{-7}$ и $9,6 \times 10^{-10}$ соответственно) тенденция увеличения биомассы капусты от участка без биоугля к участку с внесением 3 кг/м^2 биоугля.

Наибольший прирост биомассы капусты зафиксирован на участке МинБ3кг – 415% по сравнению с контролем и 53% по сравнению с участком Мин.

На участке ОргБ3кг общая биомасса капусты составила 53,88 т/га, что на 3,6% меньше, чем на участке МинБ3кг. По сравнению с контролем прирост на этом участке составил 397%, а по сравнению с участком Орг – 34%.

Оценка соотношения корневой и надземной биомассы капусты оценивалась при расчете процентного соотношения листьев, корней и плодовой части капусты (вилка) к средней биомассе одного растения на исследуемом участке. Согласно данным табл. 1 внесение биоугля привело к увеличению биомассы вилка капусты на всех участках с внесением биоугля по сравнению с биомассой капусты на контрольном участке. На контрольном участке процентное соотношение вилка : листья : корень составило 35 : 42 : 22. Так, на контрольном участке процент биомассы вилка капусты показал наименьшее значение, а процент биомассы листьев – наибольшее по сравнению со всеми вариантами опыта. Внесение биоугля в дозе 1 кг/м^2 привело к увеличению процента биомассы вилка так, что соотношение вилка : листья : корень составило 51 : 29 : 19. Внесение биоугля в дозе 3 кг/м^2 также увеличило биомассу вилка на 54 % (соотношение 54 : 27 : 18).

На участках Мин и Орг соотношение вилка : листья : корень составило 56 : 27 : 17 для обоих вариантов. Такое соотношение по проценту биомассы вилка является лучшим по сравнению с участками Б1кг и Б3кг, что также зависит от количества доступных питательных элементов. Совместное применение удобрений с биоуглем не показало существенного прироста биомассы вилка по сравнению с участками Мин и Орг, хотя общая биомасса капусты показала лучший результат на участках с совместным применением биоугля и удобрений.

Таблица 1 [Table 1]

Изменение биомассы белокочанной капусты сорта «Прибрежная» при применении биоугля, минеральных и органических удобрений и их смеси с биоуглем за вегетационный период 2018 г. на агрометеомусовых подбелах
[Changes in the biomass of cabbage of the "Coastal" variety when using biochar, mineral and organic fertilizers and their mixtures with biochar during the growing season of 2018 on Luvic Anthrosols]

Вариант опыта [Plots]	Б. кап., кг/м ² Б. кап., т/га *	Ср. б. раст., кг **	Ср. б. вилка, кг % от ср. б. раст. ***	Ср. б. покр. лист., кг % от ср. б. раст. ****	Ср. б. корня, кг % от ср. б. раст. *****
Контроль [Control]	<u>1,08 ± 0,05</u> 10,84 ± 0,48	0,52 ± 0,05	<u>0,18 ± 0,03</u> 35	<u>0,22 ± 0,01</u> 42	<u>0,12 ± 0,01</u> 22
Мин [Min]	<u>3,65 ± 0,12</u> 36,54 ± 1,22	1,49 ± 0,12	<u>0,83 ± 0,09</u> 56	<u>0,41 ± 0,03</u> 27	<u>0,25 ± 0,01</u> 17
Орг [Org]	<u>4,01 ± 0,13</u> 40,13 ± 1,31	1,57 ± 0,13	<u>0,88 ± 0,10</u> 56	<u>0,43 ± 0,03</u> 27	<u>0,26 ± 0,02</u> 17
Б1кг [BC1kg]	<u>2,29 ± 0,09</u> 22,91 ± 0,85	1,10 ± 0,09	<u>0,57 ± 0,06</u> 51	<u>0,32 ± 0,02</u> 29	<u>0,21 ± 0,01</u> 19
МинБ1кг [MinBC1kg]	<u>4,04 ± 0,12</u> 40,41 ± 1,16	1,62 ± 0,12	<u>0,94 ± 0,09</u> 58	<u>0,40 ± 0,03</u> 25	<u>0,28 ± 0,01</u> 17
ОргБ1кг [OrgBC1kg]	<u>4,90 ± 0,11</u> 49,02 ± 1,11	1,79 ± 0,11	<u>1,02 ± 0,09</u> 57	<u>0,50 ± 0,03</u> 28	<u>0,27 ± 0,01</u> 15
Б3кг [BC3kg]	<u>3,31 ± 0,13</u> 33,05 ± 1,34	1,49 ± 0,13	<u>0,81 ± 0,09</u> 54	<u>0,40 ± 0,04</u> 27	<u>0,26 ± 0,02</u> 18
МинБ3кг [MinBC3kg]	<u>5,58 ± 0,14</u> 55,83 ± 1,37	2,28 ± 0,14	<u>1,35 ± 0,10</u> 59	<u>0,59 ± 0,04</u> 26	<u>0,34 ± 0,01</u> 15
ОргБ3кг [OrgBC3kg]	<u>5,39 ± 0,13</u> 53,88 ± 1,28	2,00 ± 0,13	<u>1,13 ± 0,10</u> 56	<u>0,56 ± 0,04</u> 28	<u>0,31 ± 0,02</u> 16

* Над чертой – биомасса капусты в кг/м²; под чертой – биомасса капусты в т/га [Above the line – cabbage biomass in kg/m²; below the line – cabbage biomass in t/ha].

** Средняя биомасса одного растения на участке в кг [Average biomass of one plant per plot in kg].

*** Над чертой – средняя биомасса вилка капусты на участке в кг; под чертой – процентное выражение средней биомассы вилка капусты от средней биомассы одного растения [Above the line is the average biomass of the cabbage head on the plot in kg; below the line is the percentage expression of the average biomass of the cabbage head from the average biomass of one plant].

**** Над чертой – средняя биомасса покровных листьев капусты на участке в кг; под чертой – процентное выражение средней биомассы покровных листьев капусты от средней биомассы одного растения [Above the line is the average biomass of cabbage cover leaves on the plot in kg; below the line is the percentage expression of the average biomass of cabbage cover leaves from the average biomass of one plant].

***** Над чертой – средняя биомасса корня капусты на участке в кг; под чертой – процентное выражение средней биомассы корня капусты от средней биомассы одного растения [Above the line is the average biomass of the cabbage root on the plot in kg; below the line is the percentage expression of the average biomass of the cabbage root from the average biomass of one plant]
± – стандартная ошибка значения [standard error].

Во второй вегетационный период (2019 г.), с 11 по 16 месяцы его нахождения в почве, на поле № 1 оценивалось действие биоугля на биомассу сои. Стоит отметить, что в вегетационный период 2019 г. оценивалось последствие биоугля, так как внесение биоугля на поле № 1 производи-

лось только в 2018 г. Биомасса сои оценивалась с учетом биомассы кустов с квадратного метра, биомассы куста (с корнями), биомассы соевых бобов, количества растений с квадратного метра и высоты растений (табл. 2).

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

Изменение биомассы сои при применении биоугля, минеральных и органических удобрений и их смеси с биоуглем за вегетационный период 2019 г. на агротемногумусовых подбелах
[Changes in soybean biomass when using biochar, mineral and organic fertilizers and their mixtures with biochar during the growing season of 2019 on Luvic Anthrosols]

Вариант опыта [Plots]	Б. соев. куст., кг/м ² Б. соев. куст., т/га *	Среднее количество растений, шт./м ² **	Биомасса одного растения, кг ***	Среднее количество бобов с куста, шт. ****	Средняя высота растения, см *****
Контроль [Control]	<u>2,44 ± 0,04</u> 24,40 ± 0,40	148,14 ± 2,57	0,016	6,10 ± 0,75	73,00 ± 1,55
Мин [Min]	<u>1,87 ± 0,02</u> 18,70 ± 0,20	80,87 ± 0,83	0,023	8,20 ± 0,71	73,00 ± 2,10
Орг [Org]	<u>2,36 ± 0,02</u> 23,60 ± 0,20	103,95 ± 0,86	0,023	6,80 ± 0,36	60,20 ± 1,74
Б1кг [BC1kg]	<u>2,10 ± 0,03</u> 21,00 ± 0,30	206,93 ± 3,19	0,010	3,40 ± 0,56	90,00 ± 1,44
МинБ1кг [MinBC1kg]	<u>2,10 ± 0,02</u> 21,00 ± 0,20	144,46 ± 1,62	0,014	3,50 ± 0,65	78,00 ± 1,21
ОргБ1кг [OrgBC1kg]	<u>2,36 ± 0,02</u> 23,6 ± 0,20	150,82 ± 1,26	0,015	2,70 ± 0,58	85,00 ± 1,22
Б3кг [BC3kg]	<u>2,33 ± 0,02</u> 23,30 ± 0,20	154,71 ± 1,04	0,015	4,10 ± 0,59	80,00 ± 1,18
МинБ3кг [MinBC3kg]	<u>2,26 ± 0,01</u> 22,60 ± 0,10	137,02 ± 0,75	0,016	5,20 ± 1,42	90,00 ± 1,09
ОргБ3кг [OrgBC3kg]	<u>1,96 ± 0,02</u> 19,6 ± 0,20	77,92 ± 0,66	0,025	6,4 ± 0,79	85,00 ± 0,99

* Над чертой – биомасса соевых кустов в кг/м²; под чертой – биомасса соевых кустов в т/га [Above the line – biomass of soybean bushes in kg/m²; below the line – biomass of soybean bushes in t/ha].

** [Average number of plants, pcs/m²].

*** [Biomass of one plant, kg].

**** [Average number of beans per bush, pcs].

***** [Average plant height, cm].

± – стандартная ошибка значения [standard error].

Согласно данным табл. 2, не выявлено влияния биоугля на биомассу сои при сравнении участков Контроль, Б1кг и Б3кг ($P = 0,99$). Не выявлено влияния биоугля совместно с минеральными и органическими удобрениями на биомассу при сравнении вариантов опыта Мин, МинБ1кг и МинБ3кг ($P = 0,98$) и Орг, ОргБ1кг и ОргБ3кг ($P = 0,96$).

Сравнение результатов биомассы одного растения сои, среднего количества бобов в кусте и средней высоты куста показало, что биоуголь способствует уменьшению количества бобов сои в кусте и увеличению зеленой

биомассы сои. Достоверность заключения прослеживается при сравнении вариантов опыта Контроль, Б1кг и Б3кг ($P = 1,7 \times 10^{-6}$), Мин, МинБ1кг и МинБ3кг ($P = 2,4 \times 10^{-6}$) и Орг, ОргБ1кг и ОргБ3кг ($P = 4,9 \times 10^{-5}$). Увеличение зеленой биомассы сои и уменьшение количества бобов в кусте являются отрицательными факторами при выращивании сои на бобы.

На поле № 2 в вегетационный период 2020 г., с 1-го по 4-й месяц нахождения биоугля в почве, проводилась оценка биомассы свеклы сорта «Бордо».

Результаты измерения биомассы свеклы показали увеличение ее биомассы при применении биоугля, что предполагалось на основании результатов увеличения биомассы капусты в аналогичный период применения биоугля. Тем не менее результат увеличения биомассы свеклы не показал эффекта от внесения биоугля, который получен при исследовании влияния биоугля на биомассу капусты. Также не отмечено существенного различия в биомассе свеклы между участками с разными дозами биоугля. На участках Б1кг и Б3кг отмечено увеличение биомассы свеклы на 86 и 31% соответственно по сравнению с контролем. На участках МинБ1кг и МинБ3кг отмечено увеличение биомассы свеклы на 115 и 109% соответственно по сравнению с участком Мин. На участках ОргБ1кг и ОргБ3кг отмечено увеличение биомассы свеклы на 168 и 153% соответственно по сравнению с участком Орг.

Расчет процентного отношения биомассы корнеплода свеклы от общей биомассы свеклы показал уменьшение биомассы корнеплода при применении биоугля. В вариантах опыта Контроль, Б1кг и Б3кг процентное отношение биомассы корнеплода к общей биомассе свеклы составило 59, 57 и 56% соответственно ($P = 0,005$). В вариантах опыта Мин, МинБ1кг и МинБ3кг процентное отношение биомассы корнеплода к общей биомассе свеклы составило 60, 58 и 56% соответственно ($P = 0,01$). На участках Орг, ОргБ1кг и ОргБ3кг отмечена тенденция увеличения процентного отношения биомассы корнеплода к общей биомассе свеклы (56, 64 и 62% соответственно).

Аналогично уменьшению (на участках Контроль, Б1кг и Б3кг и Мин, МинБ1кг и МинБ3кг) или увеличению (на участках Орг, ОргБ1кг и ОргБ3кг) процентного отношения биомассы корнеплода к общей биомассе свеклы увеличивалось или уменьшалось процентное отношение биомассы зеленой части к общей биомассе свеклы. Уменьшение биомассы корнеплода и увеличение биомассы зеленой части свеклы при применении биоугля может привести к снижению урожайности товарной биомассы.

В результате двухлетнего эксперимента мы получили ожидаемый прирост урожайности культур. Максимальный прирост урожайности получен при сочетании биоугля с минеральными и органическими удобрениями. Используемые в опыте удобрения содержат необходимые концентрации доступных форм азота, фосфора и калия, что и привело к росту урожайности в вариантах опыта с сочетанием биоугля и удобрений. Несмотря на то что внесение только биоугля показало существенно меньший уровень уве-

личения урожайности, прирост был достаточно высокий по сравнению с контролем. Меньший прирост урожайности при внесении только биоугля связан с тем, что биоуголь содержит в своем составе низкий уровень доступных для растений элементов питания. Согласно проведенным нами ранее исследованиям, используемый в опыте биоуголь содержит в своем составе 0,84 мг/кг сухой массы азота, 0,44 мг/кг сухой массы фосфора и 4,15 мг/кг сухой массы калия [18]. В связи с этим сразу после внесения биоугля не является источником элементов питания для растений и без дополнительного внесения питательных элементов не приводит к увеличению доступных элементов питания в почве (табл. 3).

Т а б л и ц а 3 [Table 3]

Изменение биомассы свеклы при применении биоугля, минеральных и органических удобрений и их смеси с биоуглем за вегетационный период 2020 г. на агрогемногумусовых подбелах

[Changes in beet biomass with the use of biochar, mineral and organic fertilizers and their mixtures with biochar during the growing season of 2020 on Luvic Antrosols]

Вариант опыта [Plots]	Б. свеклы, кг/м ² Б. свеклы, т/га *	Биомасса ботвы, кг/м ² **	Биомасса кор- неплода, кг/м ² ***	Среднее количество растений, шт./м ² ****
Контроль [Control]	$0,35 \pm 0,02$ $3,50 \pm 0,20$	$0,14 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,01$	$4,68 \pm 0,22$
Мин [Min]	$0,34 \pm 0,01$ $3,40 \pm 0,10$	$0,14 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,01$	$6,02 \pm 0,21$
Орг [Org]	$0,47 \pm 0,05$ $46,7 \pm 0,54$	$0,20 \pm 0,03$	$0,26 \pm 0,03$	$7,18 \pm 0,80$
Б1кг [BC1kg]	$0,65 \pm 0,01$ $6,52 \pm 0,09$	$0,28 \pm 0,01$	$0,37 \pm 0,01$	$7,55 \pm 0,16$
МинБ1кг [MinBC1kg]	$0,73 \pm 0,02$ $7,32 \pm 0,24$	$0,31 \pm 0,02$	$0,42 \pm 0,01$	$7,82 \pm 0,48$
ОргБ1кг [OrgBC1kg]	$0,91 \pm 0,07$ $9,08 \pm 0,67$	$0,33 \pm 0,03$	$0,58 \pm 0,04$	$8,89 \pm 0,55$
Б3кг [BC3kg]	$0,46 \pm 0,04$ $4,61 \pm 0,44$	$0,21 \pm 0,02$	$0,26 \pm 0,02$	$6,71 \pm 0,48$
МинБ3кг [MinBC3kg]	$0,71 \pm 0,05$ $7,13 \pm 0,46$	$0,32 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,03$	$7,96 \pm 0,29$
ОргБ3кг [OrgBC3kg]	$0,86 \pm 0,06$ $8,59 \pm 0,65$	$0,33 \pm 0,03$	$0,53 \pm 0,04$	$9,03 \pm 0,49$

* Над чертой – биомасса свеклы в кг/м²; под чертой – биомасса свеклы в т/га [Above the line – beet biomass in kg/m²; below the line – beet biomass in t/ha].

** [Biomass of beet tops in kg/m²].

*** [Beet root biomass in kg/m²].

**** [Average number of plants, pcs/m²].

± – стандартная ошибка значения [standard error].

Важным свойством биоугля является его высокопористая и высокоуглеродистая структура [20]. Данная структура обуславливает несколько факторов, благодаря которым биоуголь способен влиять на урожайность растений и главным образом ее увеличивать. Во-первых, из-за большого коли-

чество связей углеродных остатков и большой площади поверхности порового пространства биоуголь способен поглощать, связывать и сорбировать большое количество соединений, находящихся в почве, в том числе и элементов питания растений в твердой, газообразной или растворенной в почвенном растворе форме (т.е. биоуголь поглощает почвенную влагу). Находящиеся на поверхности биоугля элементы питания являются легкодоступными для растений, что создает более благоприятные для их питания условия. Во-вторых, элементы питания, находящиеся на поверхности биоугля, являются доступными для микроорганизмов. Как отмечается, поровое пространство биоугля – идеальная среда для жизнедеятельности микроорганизмов [21, 22]. Поэтому при внесении биоугля может увеличиваться почвенная микробиологическая активность, как следствие – скорость преобразования органических остатков и урожайность культур. Также отмечено, что биоуголь способен секвестрировать (т.е. связывать и сохранять в почве) углерод [23, 24], что подтверждает измеренная эмиссия CO_2 на участках данного исследования [25], а также другие исследователи в ходе проведения аналогичных полевых опытов [23, 26, 27].

Для овощных культур, выращиваемых на почвах тяжелого механического состава с избыточным увлажнением, достаточно важно формирование благоприятного водно-воздушного режима, благодаря которому создаются оптимальные условия для усвоения минеральных форм питательных элементов и работы почвенных микробоценозов. Как показали наши многолетние исследования, в первый год после внесения биоугля он является хорошим мелиорантом, но из всех агрохимических свойств он достоверно повлиял на pH почвенного раствора, смещая значения в сторону нейтральной реакции среды [28]. При этом pH самого биоугля снизился на 1,3 единицы (с $8,09 \pm 0,06$ до $6,73 \pm 0,04$) на поле без дренажной системы, следовательно, не мог привести к существенному смещению pH почвенного раствора в сторону нейтральной реакции среды на второй год действия. Такие культуры, как капуста и свекла, достаточно чувствительны к значениям pH почвенного раствора, поэтому смещение в сторону нейтральной реакции среды могло стать одной из причин, по которым капуста и свекла показывают прирост урожайности в первый год после внесения.

После первого вегетационного периода на участках с внесением только биоугля отмечалось улучшение физических свойств почвы, в частности снижение значений плотности твердой фазы почвы, увеличение порозности и диапазона почвенной влаги. При неблагоприятных климатических условиях, приводящих к обводнению почв тяжелого гранулометрического состава, овощные культуры не дают стабильного урожая. Влияние на водно-воздушный режим в условиях избыточного или недостаточного увлажнения на исследуемых участках нивелируется дозами биоугля около 30 т/га (3 кг/м^2), что также могло стать причиной прироста урожая на участках с отсутствием дренажной системы.

На второй год после внесения снижается влияние биоугля на свойства почв. Уменьшается его эффект на сдвиг pH в сторону нейтральной реакции

среды, что может снижать эффективность усвоения минерального азота, особенно на темногумусовых подбелах, которые обогащены аморфными формами железа [29]. В биоугле после 16 месяцев нахождения в почве наблюдается небольшое увеличение значений водоудерживающей способности по сравнению со значениями после 4 месяцев нахождения в почве, а также, согласно данным электронной микроскопии, незначительно разрушается структура отдельных элементов биоугля и на его поверхности заметны частицы биологической и небиологической природы [18]. Все эти изменения в какой-то степени могут влиять на процессы, связанные с ростом и развитием растений, в частности сои.

Соя является культурой достаточно требовательной к уровню влажности почвы. Количество осадков в вегетационный период 2019 г., как показано на рис. 2, существенно превышало общее за вегетационный период среднеемесячное многолетнее значение. Особенно высокое количество осадков отмечалось в августе 2019 г., в период активного роста сои, что могло стать причиной отсутствия стабильного прироста ее биомассы.

Также стоит отметить, что по своим агрохимическим свойствам темногумусовые подбелы в ненарушенном состоянии обладают неблагоприятными условиями для выращивания многих культур [30]. Многолетние наблюдения на площадке стационара Приморской овощной опытной станции показали, что стабильно высокие урожаи можно получать только после внесения достаточных доз удобрений (органических или минеральных) и правильной планировки и обработки подбелов темногумусовых.

Выводы

1. Степень влияния биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур носит неоднозначный характер. Увеличение урожайности культур наблюдалось при действии биоугля с 0-го по 4-й месяц после внесения в почву. При действии биоугля на 11–16-й месяцы не наблюдалось достоверного увеличения урожайности. Вероятно, что при замене сои на другую культуру в период действия биоугля с 11-го по 16-й месяц возможно получить другие результаты.

2. При рассмотрении влияния биоугля на урожайность капусты белокочанной сорта «Прибрежная», сои и столовой свеклы сорта «Бордо» выявлено, что биоуголь оказывает большее влияние на биомассу зеленой части растения (надземной), чем корневой.

3. Наилучшие результаты получены при рассмотрении влияния биоугля на урожайность капусты белокочанной, что связано с формированием основной части растения из зеленой биомассы. На участке с внесением 1 кг/м^2 биоугля наблюдался прирост общей биомассы капусты в два раза по сравнению с контролем. На участке с внесением 3 кг/м^2 биоугля наблюдался прирост общей биомассы капусты в три раза по сравнению с контролем.

4. Влияние биоугля на урожайность свеклы оказало положительный, но менее выраженный результат по сравнению с влиянием биоугля на уро-

жайность капусты. На участках без внесения органических и минеральных удобрений наибольший прирост биомассы свеклы был получен при внесении 1 кг/м^2 биоугля (86%) по сравнению с контролем. Влияние внесения 3 кг/м^2 биоугля не показало большего результата на урожайность свеклы по сравнению с влиянием 1 кг/м^2 биоугля. Внесение биоугля уменьшило процент биомассы корнеплода и увеличило процент биомассы зеленой части по отношению к общей биомассе свеклы в вариантах опыта с внесением биоугля и вариантах с минеральными удобрениями, но не в вариантах с органическими удобрениями.

5. Внесение биоугля не оказало достоверного положительного эффекта на урожайность сои. Выявлено, что биоуголь увеличил биомассу зеленой (надземной) части сои и уменьшил количество бобов.

Список источников

1. Shackley S., Ibarrola Esteinou R., Hopkins D., Hammond J. Biochar Quality Mandate (BQM) version 1.0. British Biochar Foundation. 2014. 58 p.
2. Григорьян Б.Р., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Сунгатулина Л.М., Кольцова Т.Г., Рязанов С.С. Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели малогумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // Вестник Казанского технологического университета. 2016. № 11. С. 185–189.
3. Войникова Е.В., Попеня М.В. Влияние биоугля на формы нахождения урана, определяющие его биологическую доступность в сельскохозяйственных почвах // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук. 2016. С. 142–143.
4. Кулагина В.И., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Рязанов С.С., Сунгатулина Л.М., Забелкин С.А., Кольцова Т.Г. Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия // Аграрный научный журнал. 2019. № 1. С. 16–20. doi: 10.28983/asj.v0i1.460
5. Hawthorne L., Johnson M.S., Jassal R.S., Black T.A., Grant N.J., Smukler S.M. Application of biochar and nitrogen influences fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O in a forest soil // J. Environ. Manage. 2017. № 192. PP. 203–214. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.12.066
6. Czekala W., Malinska K., Caceres R., Janczak D., Dach J., Lewici A. Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar – The effect of biochar on temperature and C-CO_2 emission // Bioresour. Technol. 2016. № 200. PP. 921–927. doi: 10.1016/j.biortech.2015.11.019
7. Yang X., Meng J., Lan Y., Chen W., Yang T., Yuan J., Liu S., Han J. Effects of maize stover and its biochar on soil CO_2 emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. № 240. PP. 24–31. doi: 10.1016/j.agee.2017.02.001
8. Мухина И.М., Дурова А.С. Влияние биоугля на биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и эффективность использования растениями питательных веществ // Агрофизика. 2017. № 1. С. 26–35.
9. Farhangi-Abri S., Torabian S., Qin R., Noulas C., Lu Y., Gao S. Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis // Science of the Total Environment. 2021. № 775. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.145869
10. Nguyen B.T., Le L.B., Pham L.P., Nguyen H.T., Tran T.D., Thai N.V. The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass (*Pennisetum Purpureum Schumacher*) and properties of acidic soils // Industrial Crops and Product. 2021. № 161. PP. 1–11. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.113224

11. Мухина И.М., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. Влияние биоугля на урожайность пропашных и злаковых культур в условиях Северо-Западного региона РФ // Почвы России: вчера, сегодня, завтра : сб. ст. по материалам Всерос. с междунар. участием науч. конф., посвящ. Году экологии и 90-летию со дня рождения профессора В.В. Тюлина. Вятский государственный университет. 2017. С. 94–100.
12. Lentz R.D., Ippolito J.A. Biochar and Manure Affect Calcareous Soil and Corn Silage Nutrient Concentrations and Uptake // J. Environ. Qual. 2012. № 41. PP. 1033–1043. doi: 10.2134/jeq2011.0126
13. Biederman L.A., Harpole W.S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis // GCB Bioenerg. 2013. Vol. 5. PP. 202–214. doi: 10.1111/gcbb.12037
14. Wang J., Xiong Z., Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects // GCB Bioenergy. 2015. Vol. 8. PP. 512–526. doi: 10.1111/gcbb.12266
15. Nguyen T.T.N., Xu C., Tahmasbian I., Che R., Xu Z., Zhou X., Wallace H.M., Bai S.H. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis // Geoderma. 2017. Vol. 288. PP. 79–96. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.11.004
16. Razzaghi F., Obour P.B., Arthur E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis // Geoderma. 2020. Vol. 361. P. 114055. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114055
17. International Biochar Initiative / IBI. 2018. URL: <https://biochar-international.org/>
18. Bovsun M.A., Nesterova O.V., Semal V.A., Khokhlova A.I., Sakara N.A. Changes in the composition and properties of biochar after one-year application // E3S Web of Conferences. 2020. № 217. 10009. doi: 10.1051/e3sconf/202021710009
19. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
20. Spokas K.A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios // Carbon Manage. 2010. Vol. 1. PP. 289–303.
21. Мухина И.М. Влияние карбонизированной биомассы на параметры плодородия дерново-подзолистых почв и эмиссию парниковых газов. СПб., 2017. 187 с.
22. Орлова Н.Е. Лабутова Н.М., Орлова Е.Е., Банкина Т.А. Биохимические и микробиологические аспекты применения биоугля в качестве мелиоранта почв // Сборник научных трудов, посвященный 95-летию Кубанского ГАУ. Краснодар, 2017. С. 323–325.
23. Mukherjee A., Lai R., Zimmerman A.R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil // Science of Total Environment. 2014. № 487. PP. 26–36. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.141
24. Wu Z., Zhang X., Dong Y., Li B., Xiong Z. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. № 278. PP. 107625. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107625
25. Bovsun M.A., Castaldi S., Nesterova O.V., Semal V.A., Sakara N.A., Brikmans A.V., Khokhlova A.I., Karpenko T.Y. Effect of Biochar on Soil CO₂ Fluxes from Agricultural Field Experiments in Russian Far East // Agronomy. 2021. Vol. 11. 1559. doi: 10.3390/agronomy11081559
26. Wang C., Shen J., Liu J., Qin H., Yuan Q., Fan F., Hu Y., Wang J., Wei W., Li Y., Wu J. Microbial mechanisms in the reduction of CH₄ emission from double rice cropping system amended by biochar: A four-year study // Soil Biology and Biochemistry. 2019. № 135. PP. 251–263. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.05.012
27. Wu D., Senbayram M., Zang H., Ugurlar F., Aydemir S., Bruggemann N., Kuzyakov Y., Bol R., Blagodatskaya E. Effect of biochar origin and soil pH on greenhouse gas emissions from sandy and clay soils // Applied Soil Ecology. 2018. № 129. PP. 121–127. doi: 10.1016/j.apsoil.2018.05.009

28. Нестерова О.В., Семаль В.А., Бовсун М.А., Васенев И.И., Брикманс А.В., Карпенко Т.Ю., Сакара Н.А. Изменение свойств агропочв юга Дальнего Востока России при внесении биочара // *Агрохимический вестник*. 2021. № 5. С 18–23.
29. Иванов Г.И. Почвы Приморского края. Владивосток : Дальневосточ. кн. изд-во, 1964. 107 с.
30. Сакара Н.А., Леунов В.И., Сухомиров Г.И., Тарасова Т.С., Ознобихин В.И. Развитие овощеводства дальнего востока России в историческом и научно-производственном аспектах // *Аграрный вестник Приморья*. 2021. С. 18–29.

References

1. Shackley S, Ibarrola Esteinou R, Hopkins D, Hammond J. Biochar Quality Mandate (BQM) version 1.0. British Biochar Foundation. 2014. 58 p.
2. Grigoryan BR, Grachev AN, Kulagina VI, Sungatullina LM, Koltsova TG, Ryazanov SS. Vliyaniye biouglya na rost rasteniy. mikrobiologicheskkiye i fiziko-khimicheskkiye pokazateli malo gumusirovannoy pochvy v usloviyakh vegetatsionnogo opyta [The effect of biochar on plant growth, microbiological and physico-chemical parameters of low humus soil in the conditions of vegetation experience]. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2016;11:185-189. In Russian
3. Voynikova EV, Popenya MV. Vliyaniye biouglya na formy nakhozhdeniya urana opredelyayushchiye ego biologicheskuyu dostupnost v selskokhozyaystvennykh pochvakh [The influence of biochar on the forms of finding uranium that determine its biological availability in agricultural soils]. *Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry named after A.N. Frumkin of the Russian Academy of Sciences*. 2016:142-143. In Russian
4. Kulagina VI, Grachev AN, Shagidullin RR, Ryazanov SS, Sungatulina LM, Zabelkin SA, Koltsova TG. Influence of biochar on the soil structure and the content of potassium forms. *Agrarian Scientific Journal*. 2019;1:16-20. doi: 10.28983/asj.v0i1.460 In Russian, English summary
5. Hawthorne L, Johnson MS, Jassal RS, Black TA, Grant NJ and Smukler SM. Application of biochar and nitrogen influences fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in a forest soil. *J. Environ. Manage*. 2017;192:203-214. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.12.066
6. Czekala W, Malinska K, Caceres R, Janczak D, Dach J and Lewici A. Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar – The effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission. *Bioresour. Technol*. 2016;200:921-927. doi: 10.1016/j.biortech.2015.11.019
7. Yang X, Meng J, Lan Y, Chen W, Yang T, Yuan J, Liu S and Han J. Effects of maize stover and its biochar on soil CO₂ emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2017;240:24-31. doi: 10.1016/j.agee.2017.02.001
8. Mukhina IM, Durova AS. Vliyaniye biouglya na biologicheskkiye svoystva dernovo-podzolistoy supeschanoy pochvy i effektivnost ispolzovaniya rasteniyami pitatelnykh veshchestv [The influence of biochar on the biological properties of sod-podzolic sandy loam soil and the efficiency of the use of nutrients by plants]. *Agrophysics*. 2017;1:26-35. In Russian
9. Farhangi-Abriz S, Torabian S, Qin R, Noulas C, Lu Y, Gao S. Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 2021;775:145689. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.145869
10. Nguyen BT, Le LB, Pham LP, Nguyen HT, Tran TD, Thai NV. The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass (*Pennisetum Purpureum* Schumacher) and properties of acidic soils. *Industrial Crops and Product*. 2021;161:1-11. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.113224
11. Mukhina IM, Rizhiya EYa, Buchkina NP, Balashov EV. Vliyaniye biouglya na urozhaynost propashnykh i zlakovykh kultur v usloviyakh Severo-Zapadnogo regiona RF [The influence of biochar on the yield of row crops and cereals in the conditions of the North-Western region of the Russian Federation. Soils of Russia: yesterday, today, tomorrow]. In: *Pochvy Rossii: vchera, segodnya, zavtra: Sbornik statey po materialam*

- Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiyem nauchnoy konferentsii. posvyashchennoy Godu ekologii i 90-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.V. Tyulina. [In: A collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the Year of Ecology and the 90th anniversary of the birth of Professor V.V. Tyulin. (Vyatskiy gosudarstvennyy universitet. 2017)] Vyatka State University, 2017. PP. 94-100. In Russian
12. Lentz RD and Ippolito JA. Biochar and Manure Affect Calcareous Soil and Corn Silage Nutrient Concentrations and Uptake. *J. Environ. Qual.* 2012;41:1033-1043. doi: 10.2134/jeq2011.0126
13. Biederman LA, Harpole WS. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenerg.* 2013;5:202-214. doi: 10.1111/gcbb.12037
14. Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy.* 2015;8:512-526. doi: 10.1111/gcbb.12266
15. Nguyen TTN, Xu C, Tahmasbian I, Che R, Xu Z, Zhou X, Wallace HM, Bai SH. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma.* 2017;288:79-96. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.11.004
16. Razzaghi F, Obour PB, Arthur E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma.* 2020;361:114055. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114055
17. International Biochar Initiative. IBI. 2018. p. Available at: <https://biochar-international.org/> (accessed 22.07.2022).
18. Bovsun MA, Nesterova OV, Semal VA, Khokhlova AI, Sakara NA. Changes in the composition and properties of biochar after one-year application. *E3S Web of Conferences.* 2020;217:10009. doi: 10.1051/e3sconf/202021710009
19. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils of Russia]. Smolensk: Oikumena; 2004. 342 p. In Russian
20. Spokas KA. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Manage.* 2010;1:289-303.
21. Mukhina IM. Vliyaniye karbonizirovannoy biomassy na parametry plodorodiya dernovo-podzolistykh pochv i emissiyu parnikovykh gazov [Influence of carbonized biomass on the fertility parameters of sod-podzolic soils and greenhouse gas emissions]. St. Petersburg; 2017. 187 p. In Russian
22. Orlova NE, Labutova NM, Orlova EE, Bankina TA. Biokhimicheskiye i mikrobiologicheskiye aspekty primeneniya biouglya v kachestve melioranta pochv [Biochemical and microbiological aspects of the use of biochar as a soil meliorant]. Collection of scientific papers dedicated to the 95th anniversary of the Kuban State Agrarian University. 2017. PP. 323-325. In Russian
23. Mukherjee A, Lai R, Zimmerman AR. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of Total Environment.* 2014;487:26-36. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.141
24. Wu Z, Zhang X, Dong Y, Li B, Xiong Z. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2019;278:107625. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107625
25. Bovsun MA, Castaldi S, Nesterova OV, Semal VA, Sakara NA, Brikmans AV, Khokhlova AI, Karpenko TY. Effect of Biochar on Soil CO₂ Fluxes from Agricultural Field Experiments in Russian Far East. *Agronomy.* 2021;11:1559. doi: 10.3390/agronomy11081559
26. Wang C, Shen J, Liu J, Qin H, Yuan Q, Fan F, Hu Y, Wang J, Wei W, Li Y, Wu J. Microbial mechanisms in the reduction of CH₄ emission from double rice cropping system amended by biochar: A four-year study. *Soil Biology and Biochemistry.* 2019;135:251-263. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.05.012
27. Wu D, Senbayram M, Zang H, Ugurlar F, Aydemir S, Bruggemann N, Kuzyakov Y, Bol R, Blagodatskaya E. Effect of biochar origin and soil pH on greenhouse gas emissions

- from sandy and clay soils. *Applied Soil Ecology*. 2018;129:121-127. doi: 10.1016/j.apsoil.2018.05.009
28. Nesterova O.V., Semal V.A., Bovsun M.A., Vasenev I.I., Brikmans A.V., Karpenko T.Y., Sakara N.A. Changes in the properties of agricultural soils in the South of the Russian Far East during the introduction of biochar. *Agrochemical Bulletin*. 2021;5:18-23.
29. Ivanov G.I. Soils of Primorsky Krai. Vladivostok : Far Eastern Book Publishing House, 1964. 107 p.
30. Sakara N.A., Leunov V.I., Sukhomirov G.I., Tarasova T.S., Oznobikhin V.I., Development of vegetable growing in the Russian Far East in historical, scientific and production aspects. *Agrarian Bulletin of Primorye*. 2021:18-29.

Информация об авторах:

Бовсун Мария Александровна – аспирант кафедры почвоведения, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия).

E-mail: bovsun.mal@dvfu.ru

Нестерова Ольга Владимировна – канд. биол. наук, доцент кафедры почвоведения, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия).

E-mail: nesterova.ov@dvfu.ru

Семаль Виктор Андреевна – канд. биол. наук, доцент кафедры почвоведения, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия); с.н.с. сектора почвоведения и экологии почв, ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (Владивосток, Россия).

E-mail: semal.va@dvfu.ru

Сакара Николай Андреевич – канд. с-х. наук, директор по науке Приморской овощной опытной станции – филиала федерального государственного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (Артем, Россия).

E-mail: nsakara@inbox.ru

Брикманс Анастасия Владимировна – канд. биол. наук, доцент кафедры почвоведения, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия).

E-mail: brikmans.av@dvfu.ru

Карпенко Татьяна Юрьевна – ассистент кафедры почвоведения, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия).

E-mail: karpenko.tiu@dvfu.ru

Тарасова Татьяна Сергеевна – н. с. Приморской овощной опытной станции – филиала федерального государственного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (Владивосток, Россия).

E-mail: nsakara@inbox.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Maria A. Bovsun, post-graduate student of the Department of Soil Science of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: bovsun.mal@dvfu.ru

Olga V. Nesterova, PhD, Associate Professor of the Department of Soil Science of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: nesterova.ov@dvfu.ru

Viktoriia A. Semal, PhD, Associate Professor of the Department of Soil Science of the Far Eastern Federal University Senior Researcher of the Sector of Soil Science and Soil Ecology of the Federal Research Center for the Biodiversity of Terrestrial Biota of East Asia, FEB RAS (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: semal.va@dvfu.ru

Nikolay A. Sakara, PhD, Director for Science of the Primorsky Vegetable Experimental Station - branch of the Federal State Scientific Institution "Federal Scientific Center of Vegetable Growing" (Artem, Russian Federation).

E-mail: nsakara@inbox.ru

Anastasia V. Brikmans, PhD, Associate Professor of the Department of Soil Science of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: brikmans.av@dvfu.ru

Tatiana Yu. Karpenko, Assistant of the Department of Soil Science of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

E-mail: karpenko.tiu@dvfu.ru

Tatiana S. Tarasova, researcher at the Primorsky Vegetable Experimental Station, a branch of the Federal State Scientific Institution "Federal Scientific Center for Vegetable Growing" (Artem, Russian Federation).

E-mail: nsakara@inbox.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 04.08.2022;
одобрена после рецензирования 01.04.2023; принята к публикации 02.08.2023.*

*The article was submitted 04.08.2022;
approved after reviewing 01.04.2023; accepted for publication 02.08.2023.*