

Научная статья
УДК 631.84:631.46
doi: 10.17223/19988591/61/2

Воздействие совместного внесения биоугля и минеральных азотных удобрений на растения овса посевного и биологические свойства почв

Валентина Ивановна Кулагина¹, Андрей Николаевич Грачев²,
Рифгат Роальдович Шагидуллин³, Люция Мансуровна Сунгатуллина⁴,
Станислав Сергеевич Рязанов⁵, Сергей Андреевич Забелкин⁶

^{1, 3, 4, 5} Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, Россия

^{2, 6} Казанский национальный исследовательский технологический университет,

Казань, Россия

¹ viksoil@mail.ru

² energolesprom@gmail.com

³ shagidullin_@mail.ru

⁴ sunlyc@yandex.ru

⁵ RStanislav.soil@yandex.ru

⁶ szabelkin@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено воздействие внесения биоугля в сочетании с минеральными азотными удобрениями и без них в бедную песчаную почву на развитие растений овса посевного (*Avéna satíva* L.), микробиологические, биохимические и физико-химические свойства почв. Биоуголь был получен из иловых осадков сточных вод г. Чебоксары при температуре 500 ± 20°C. Исследования проводились в рамках вегетационного опыта. Показано, что максимальное число живых растений на 42-й день опыта наблюдается при внесении биоугля в количестве 10% от веса почвы без дополнительного внесения удобрений. Средняя высота и биомасса растений на 42-й день опыта на всех вариантах не имела статистически значимых отличий от контроля. Совместное внесение биоугля и минеральных азотных удобрений привело к увеличению содержания в почве щелочногидролизующего азота и к всплеску микробиологической активности. Однако корреляционная зависимость между числом выживших растений и общей численностью микроорганизмов оказалась отрицательной. Зависимость между числом выживших растений и ферментативной активностью почвы не обнаружена.

Ключевые слова: биоуголь; осадки сточных вод; азотные удобрения; овес посевной; биологическая активность почв; ферментативная активность.

Для цитирования: Кулагина В.И., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Сунгатуллина Л.М., Рязанов С.С., Забелкин С.А. Воздействие совместного внесения биоугля и минеральных азотных удобрений на растения овса посевного и биологические свойства почв // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2023. № 61. С. 27–44. doi: 10.17223/19988591/61/2

The Impact of the Joint Application of Biochar and Mineral Nitrogen Fertilizers on Oat Plants and the Biological Properties of Soils

Valentina I. Kulagina¹, Andrey N. Grachev², Rifgat R. Shagidullin³,
Lutsia M. Sungatullina⁴, Stanislav S. Ryazanov⁵, Sergey A. Zabelkin⁶

^{1, 3, 4, 5} Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

^{2, 6} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

¹ viksoil@mail.ru

² energoesprom@gmail.com

³ shagidullin_@mail.ru

⁴ sunlyc@yandex.ru

⁵ RStanislav.soil@yandex.ru

⁶ szabelkin@gmail.com

Summary. Sewage sludge is hard to dispose waste, not only due to its large volumes. It contains heavy metals, pathogenic microorganisms, and helminth eggs. For this reason, although it contains substances valuable for plant nutrition, sewage sludge cannot be inserted into the soil without prior treatment. Before being inserted into the soil, the sewage sludge must undergo appropriate treatment to comply with environmental and sanitary requirements. Pyrolysis is one of the most promising methods for processing sewage sludge, although this method is one of the least used at present. Biochar is the solid product of sewage sludge pyrolysis. It usually contains high amounts of phosphorus and potassium and some amount of available nitrogen. The data about the impact of biochar application on plant productivity and activity of soil microbiota are contradictory. The effect of combined use of biochar and mineral nitrogen fertilizers has not been studied enough. The study was aimed to investigate the effect of application of various amounts of sewage sludge biochar in combination with mineral fertilizers to poor sandy soils on the productivity of oat plants (*Аvéна satíva* L.) and the microbiological and biochemical properties of the soil.

The laboratory vegetative experiment was carried out for 42 days. Soil and biochar mixture (400 g) was placed in vegetation vessels. The soil was soddy-podzolic sandy (according to the USSR classification) or Glossic Retisols (Arenic) (according to WRB (2014)). Biochar from sewage sludge was obtained at a temperature of +500±20°C. The proportions of the applied biochar was 2%, 5% and 10% by weight. Mineral nitrogen fertilizers were applied at rates of 0.1 g, 0.2 g, and 0.3 g of active ingredient per 1 kg of soil. A common oat (*Аvéна satíva* L.) were sown in the amount of 12 seeds per vegetation vessel. After seed germination, the plants were thinned out, leaving 8 plants in each vessel. On the 14th day, half of the plants (4 units) in each pot were cut off, and the average height and dry biomass were measured. The experiment with the remaining 4 units lasted up to 42 days. The experiment was carried out in four replications. The soil without biochar and without mineral fertilizers was used as a control. The number of trophic groups of microorganisms was determined by sowing dilutions of soil suspensions on solid media. In addition, urease, catalase and invertase activities were identified.

The results showed that the combined application of biochar and fertilizers to poor sandy soil affected the number of surviving oat (*Аvéна satíva* L.) plants by day 42 of the experiment (See Table 2). The best result – all plants survived – was obtained when applying 10% of biochar without additional mineral fertilizers. At biochar pro-

portion of 10%, additional nitrogen fertilizers turned out to be inexpedient and led to a decrease in the survival rate of plants. The proportions of 2% and 5% of biochar without fertilizers has led to an increase of the number of surviving plants compared to the control (clear soil). Additional application of mineral nitrogen fertilizers increased the number of surviving plants at proportions of 0.1 g/kg and 0.2 g/kg in combination with 2% of biochar and at a proportion of 0.1 g/kg in combination with 5% of biochar. The average height and biomass of plants on day 42 of the experiment in all variants did not have statistically significant differences from the control (See Table 3).

The joint and separate applications of fertilizers and biochar to poor sandy soil in most cases have led to an increase in the content of alkaline hydrolysable nitrogen compared to the control (See Fig. 1). However, the correlation between the number of surviving plants and the content of alkaline hydrolysable nitrogen turned out to be weak and negative, $r = -0.36$.

The application of biochar led to a statistically significant alkalization of the reaction of water extract, but at the same time the reaction remained in the gradations of neutral and slightly alkaline (See Fig. 2). With the joint application, the alkalinizing effect of biochar decreased with an increase in the proportion of nitrogen fertilizers. No relationship between the number of surviving plants and the reaction of the water suspension was found; the correlation coefficient was $r = -0.004$.

The conducted study allowed establishing that on day 42 of the experiment, the total microbial number (TMC) increased with an increase of the biochar proportions. The soil biological activity was highest at maximal proportions of biochar and nitrogen fertilizers, although two-way analysis of variance showed that only the concentration of biochar had a significant effect on the total number of microorganisms (See Table 5). The lowest number of surviving plants was observed in the variants with the highest microbiological activity. The correlation between the number of surviving plants and TMC turned out to be medium and negative ($r = -0.53$).

The relationship between the number of other trophic groups of microorganisms and the survival rate of plants and between the activity of enzymes and the survival rate of plants was not found.

Two-way analysis of variance showed that the proportions of nitrogen fertilizers and biochar, and also their interaction, had a statistically significant effect on the number of living plants on day 42 of the experiment, the final content of alkaline hydrolysable nitrogen in the soil, soil acidity, the content of amylolytic microorganisms and micromycetes, and all parameters of enzymatic activity (See Table 5). The content of actinomycetes was significantly affected primarily by the concentration of biochar; the effect of nitrogen fertilizers was only observed when combined with biochar.

The paper contains 2 figures, 5 Tables and 18 references.

Keywords: biochar, sewage sludge, nitrogen fertilizers, oats, soil biological activity, enzymatic activity

For citation: Kulagina VI, Grachev AN, Shagidullin RR, Sungatullina LM, Ryazanov SS, Zabelkin SA. The Impact of the Joint Application of Biochar and Mineral Nitrogen Fertilizers on Oat Plants and the Biological Properties of Soils. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2023;61:27-44. doi: 10.17223/19988591/61/2

Введение

Осадки сточных вод (ОСВ) относятся к трудоемким для утилизации отходам не только благодаря большим объемам – ОСВ содержат тяжелые металлы, патогенные микроорганизмы, яйца гельминтов. По этой причине ОСВ нельзя просто внести в почву, хотя они содержат вещества, ценные

для питания растений. Перед внесением в почву осадки должны пройти соответствующую обработку для соблюдения экологических и санитарных требований.

Пиролиз – один из самых перспективных, хотя и наименее используемых в настоящее время методов переработки осадков сточных вод [1–3]. Твердым продуктом пиролиза является биоуголь, или, по-другому, пироуглерод [1, 3]. Однако внесение биоугля в почву целесообразно лишь в том случае, когда оно не ухудшает, а улучшает свойства почв, способствует повышению продуктивности растений, биологической активности почвы и др. Биоуголь имеет ряд преимуществ перед ОСВ. При пиролизе илов сточных вод происходит их термическая стерилизация, в результате биоуголь избавлен от патогенов и веществ, обладающих сильным неприятным запахом [3]. Биоуголь имеет пористую структуру и огромную площадь поверхности микропор, пригодную для поселения почвенных микроорганизмов [4]. В большинстве случаев биоуголь имеет нейтральную или щелочную реакцию среды, что способствует улучшению свойств кислых почв [5, 6]. По некоторым данным, биоуголь способствует более быстрому разложению гербицидов в почве [7].

К недостаткам биоугля можно отнести более высокую по сравнению с ОСВ концентрацию тяжелых металлов (ТМ), которая увеличивается благодаря уменьшению объема исходного продукта при пиролизе. Впрочем, большинство исследователей отмечают, что ТМ в биоугле переходят в менее растворимую и менее доступную для растений форму [8–10]. Проведенные нами ранее исследования показали, что содержание Cr, Cu, Fe, Ni и Zn в растениях овса и горчицы, выращенных на почвах с добавлением 2–10% биоугля, полученного при $500 \pm 20^\circ\text{C}$ из илов сточных вод, не отличалось от содержания данных металлов на контроле [11].

Биоуголь обычно содержит достаточное количество соединений фосфора и калия, необходимых для питания растений, но соединения азота теряются при термической обработке, поэтому для повышения продуктивности растений исследователи рассматривают варианты внесения биоугля с минеральными азотными удобрениями или с органическими удобрениями [5, 12, 13].

Данные о влиянии внесения биоугля из илов сточных вод на продуктивность растений противоречивы. Одни исследователи утверждают, что внесение биоугля из илов сточных вод увеличивает высоту и биомассу растений [7–9], другие отмечают снижение урожайности при дозах внесения биоугля 20 т/га [14], третьи указывают, что воздействие на урожайность сильно зависит от свойств биоугля и почвы [5, 6]. Подобные расхождения делают еще более актуальным подбор правильных доз и условий внесения биоугля в почвы.

Цель работы – исследование влияния внесения различных количеств биоугля из илов сточных вод в комплексе с минеральными удобрениями в бедные песчаные дерново-подзолистые почвы на продуктивность растений овса и микробиологические и биохимические свойства почвы.

Материалы и методики исследования

Для проведения вегетационного опыта была выбрана песчаная почва из Лаишевского района Республики Татарстан, близ с. Тарлаши. Согласно «Классификации и диагностике почв СССР» 1977 г., почва отнесена к дерново-подзолистым [15], согласно WRB (2014) – Glossic Retisols (Arenic) [16]. Почва отличалась очень низким плодородием, из-за чего несколько лет находилась в залежи. Образцы для проведения вегетационного опыта были отобраны из бывшего пахотного горизонта на глубину 18 см. Реакция среды водной вытяжки нейтральная по группировке Е.В. Аринушкиной – pH равен 6,6. Содержание гумуса очень низкое – 0,6%, содержание щелочно-гидролизующего азота, по А.Х Корнфилду, согласно агрохимической группировке почв, очень низкое – 24,5 мг/кг. Содержание подвижных фосфора и калия, определенных методом Чирикова (ГОСТ 26204-91), среднее – 82,0 и 112 мг/кг соответственно. Гранулометрический состав почвы представлен в табл. 1. Предполагалось, что именно на таких почвах эффект от внесения биоугля проявится лучше всего.

Т а б л и ц а 1 [Table 1]

Гранулометрический состав дерново-подзолистой почвы [Particle size distribution of Glossic Retisols (Arenic)]

Содержание фракций, % [Fraction content, %]					
1–0,25 мм	0,25–0,05 мм	0,05–0,01 мм	0,01–0,005 мм	0,005–0,001 мм	< 0,001 мм
0,00	74,41	16,20	2,46	4,27	2,66

Биоуголь был получен при температуре $500 \pm 20^\circ\text{C}$ из иловых осадков сточных вод г. Чебоксары, высушенных до влажности 15% и гранулированных. Для получения угля использовалась установка быстрого пиролиза FPP02, которая является запатентованной разработкой компании ООО «Энерголеспром», г. Казань.

Содержание общего нелетучего углерода в биоугле 68,7%, зольность 19,3%. Реакция среды водной вытяжки щелочная ($\text{pH}_{\text{водный}} = 7,9$). Содержание щелочногидролизующего азота 105 мг/кг, подвижных калия и фосфора – 800 и 3 350 мг/кг соответственно.

Почва, предназначенная для опыта, предварительно высушивалась, растиралась и просеивалась сквозь сито с диаметром отверстий 2 мм. В вегетационные сосуды помещалось по 400 г почвы или смеси почвы с биоуглем. Количество вносимого биоугля составляло 2, 5 и 10% от веса почвы. Минеральные азотные удобрения добавлялись из расчета 0,1, 0,2 и 0,3 г действующего вещества на 1 кг почвы. Опыт проведен в четырехкратной повторности. В качестве контроля использовалась почва без угля и без минеральных удобрений.

Растения выращивались и анализировались согласно ГОСТ Р ИСО 22030-2009. В ходе эксперимента в сосудах поддерживалась оптимальная влажность. В каждый сосуд высевалось по 12 семян овса посевного (*Avéna*

sativa L.). После прорастания семян прореживали растения, оставив по 8 штук. На 14-й день половина растений (4 штуки) в каждом вегетационном сосуде срезалась, определялась средняя высота и сухая биомасса.

Опыт с оставшимися 4 растениями продолжался до 42-го дня. После чего растения срезались, измерялись и высушивались для определения сухой биомассы, учитывалось количество живых растений. Из вегетационных сосудов отбирались пробы для определения микробиологических, биохимических и агрохимических параметров.

Численность трофических групп микроорганизмов определялась посевом разведений почвенных взвесей на твердые среды.

Уреазная активность почв определялась методом А.Ш. Галстяна с окончанием, предложенным Ф.Х. Хазиевым, основанным на колориметрическом определении аммиака реактивом Нesslera [17]. Инвертазная активность определялась методом Т.А. Щербаковой с 3,5-динитросалициловой кислотой. Каталазная активность почв определялась методом Джонсона и Темпле в мл 0,1 н $\text{KMnO}_4/\text{г}$ сухой почвы за 20 мин [17].

Щелочногидролизуемый азот в почве определялся по Корнфилду. Реакция среды водной вытяжки определялась по ГОСТ 26423-85.

Влияние доз биоугля и азотных удобрений на изученные параметры растений и почвы оценено при помощи двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с I последовательным типом расчета суммы квадратов, показывающим в первую очередь значимость взаимодействия независимых факторов на переменную. Зависимость между переменными оценена при помощи параметрического коэффициента корреляции по Пирсону.

Результаты исследования и обсуждение

Наиболее наглядным результатом внесения биоугля в бедную песчаную почву следует признать число выживших растений овса посевного (*Avéna sativa* L.) к 42-му дню опыта. На 14-й день опыта все растения были живы на всех вариантах. Однако к 42-му дню только на варианте с 10% биоугля без добавления минеральных удобрений выжили все 16 растений из 4 повторностей (табл. 2). Контрольная песчаная дерново-подзолистая почва обладала крайне неблагоприятными свойствами, и на контроле к 42-му дню выжило в сумме только 5 растений. В вариантах без удобрений выживаемость растений возрастала в ряду: контроль (почва) < почва с 2% биоугля < почва с 5% биоугля < почва с 10% биоугля (табл. 2).

Таким образом, внесение биоугля из илов сточных вод в бедную песчаную почву оказало благоприятное воздействие на растения. Это согласуется с данными китайских исследователей, вносивших биоуголь из илов сточных вод в истощенную песчаную почву в соотношении 3:1 [8]. Для почв с более тяжелым гранулометрическим составом оптимальными оказываются меньшие концентрации биоугля, обычно 2–5% от веса почвы [6].

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

Число живых растений, высота и биомасса растений овса посевного
(*Аvéна satíva* L.) (среднее $\pm$ стандартное отклонение)
[Number of survived plants, plant height and plant biomass of oat (*Аvéна satíva* L.)
(mean $\pm$ standard deviation)]

№ варианта [Variant number]	Вариант опыта [Experiment variant]	Число живых растений на 42-й день опыта, шт. [The number of survived plants on the 42nd day of the experiment, units]	Высота растений, см [Plant height, cm]		Сухая биомасса в пересчете на одно растение, г [Dry biomass in terms of one plant unit, g]	
			14 день [day 14]	42 день [day 42]	14 день [day 14]	42 день [day 42]
1	Контроль (почва) [Control (soil)]	5	14,7 $\pm$ 1,1	24,3 $\pm$ 6,0	0,009 $\pm$ 0,001	0,021 $\pm$ 0,013
2	0,1 г N/кг почвы [0.1 g N/kg soil]	10	14,8 $\pm$ 1,8	22,2 $\pm$ 4,5	0,009 $\pm$ 0,002	0,023 $\pm$ 0,008
3	0,2 г N / кг почвы [0.2 g N/kg soil]	11	14,9 $\pm$ 0,3	21,5 $\pm$ 3,9	0,005 $\pm$ 0,002	0,024 $\pm$ 0,002
4	0,3 г N / кг почвы [0.3 g N/kg soil]	9	14,2 $\pm$ 0,4	24,2 $\pm$ 3,6	0,008 $\pm$ 0,001	0,025 $\pm$ 0,001
5	2% биоугля [2% biochar]	11	14,9 $\pm$ 1,8	23,2 $\pm$ 5,0	0,011 $\pm$ 0,001	0,022 $\pm$ 0,003
6	2% биоугля + 0,1 г N [2% biochar + 0.1 g N]	12	14,9 $\pm$ 0,7	23,0 $\pm$ 3,1	0,011 $\pm$ 0,002	0,023 $\pm$ 0,004
7	2% биоугля + 0,2 г N [2% biochar + 0.2 g N]	13	14,3 $\pm$ 1,2	23,2 $\pm$ 3,9	0,010 $\pm$ 0,001	0,020 $\pm$ 0,001
8	2% биоугля + 0,3 г N [2% biochar + 0.3 g N]	9	14,0 $\pm$ 1,2	21,6 $\pm$ 4,3	0,010 $\pm$ 0,001	0,020 $\pm$ 0,006
9	5% биоугля [5% biochar]	13	15,5 $\pm$ 1,1	22,4 $\pm$ 4,4	0,012 $\pm$ 0,001*	0,020 $\pm$ 0,003
10	5% биоугля + 0,1 г N [5% biochar + 0.1 g N]	14	14,6 $\pm$ 1,4	20,9 $\pm$ 4,5	0,011 $\pm$ 0,003	0,020 $\pm$ 0,005
11	5% биоугля + 0,2 г N [5% biochar + 0.2 g N]	10	14,3 $\pm$ 1,1	20,6 $\pm$ 2,7	0,011 $\pm$ 0,001*	0,019 $\pm$ 0,001
12	5% биоугля + 0,3 г N [5% biochar + 0.3 g N]	3	14,0 $\pm$ 1,0	22,7 $\pm$ 4,0	0,012 $\pm$ 0,001*	0,021 $\pm$ 0,009
13	10% биоугля [10% biochar]	16	13,2 $\pm$ 1,2	17,8 $\pm$ 4,6	0,007 $\pm$ 0,001*	0,014 $\pm$ 0,002
14	10% биоугля + 0,1 г N [10% biochar + 0.1 g N]	9	12,5 $\pm$ 0,9*	19,9 $\pm$ 3,7	0,009 $\pm$ 0,001	0,017 $\pm$ 0,006
15	10% биоугля + 0,2 г N [10% biochar + 0.2 g N]	3	10,9 $\pm$ 1,0*	21,9 $\pm$ 2,4	0,007 $\pm$ 0,001*	0,023 $\pm$ 0,002
16	10% биоугля + 0,3 г N [10% biochar + 0.3 g N]	1	10,1 $\pm$ 0,8*	14,5 $\pm$ 0,0	0,007 $\pm$ 0,001	0,028 $\pm$ 0,000

* Статистически значимая разница с контролем (тест Стьюдента) [Statistically significant difference with the control (Student's test)].

Внесение азотных удобрений без биоугля повышало выживаемость растений, но не больше, чем внесение 2% биоугля от веса почвы без удобрений. При совместном внесении чем больше была доза биоугля, тем при меньшем количестве минеральных удобрений наблюдалась лучшая выживаемость растений. При 10% биоугля последовательное увеличение дозы

азотных удобрений приводило к последовательному ухудшению выживаемости растений (см. табл. 2).

Результаты по средней высоте и биомассе растений оказались не столь показательными.

Установлено, что на 14-й день опыта высота растений статистически значимо отставала от контроля только на вариантах, где кроме биоугля в количестве 10% от веса почвы были внесены азотные удобрения (тест Стьюдента, $p < 0,05$). Это показывает, что внесение минеральных азотных удобрений при дозе биоугля 10% является излишним. На 42-й день высота растений овса посевного (*Аvéна satíva* L.) на всех вариантах опыта выровнялась и статистически значимо не отличалась от контроля.

Сухая биомасса растений овса посевного (*Аvéна satíva* L.) в пересчете на одно растение на 14-й день опыта на вариантах с 5 и 10% биоугля имела статистически значимые отличия от контроля (тест Стьюдента, $p < 0,05$). Однако на 42-й день опыта статистическая обработка результатов показала, что отдельное и совместное внесение в почву биоугля и удобрений не привело к достоверному изменению сухой биомассы овса посевного по сравнению с контролем (тест Стьюдента, $p < 0,05$).

Предполагалось, что выживаемость растений, их высота и биомасса зависят от изменения почвенных условий. Проведенные исследования позволили установить, что к 42-му дню опыта содержание щелочногидролизующего азота в почве почти на всех вариантах опыта было статистически значимо выше, чем на контроле, в некоторых случаях почти в три раза. Содержание щелочногидролизующего азота в почве возрастало и при увеличении дозы минеральных удобрений, и при увеличении концентрации биоугля (рис. 1).

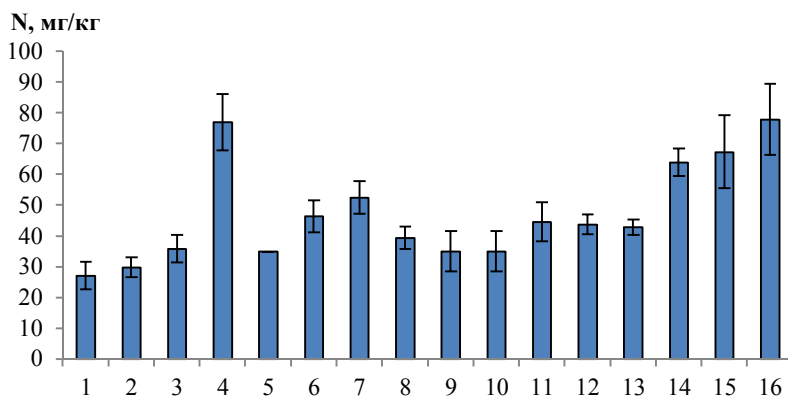


Рис. 1. Содержание щелочногидролизующего азота в почве на 42-й день опыта (среднее и стандартное отклонение). По оси ординат – содержание щелочногидролизующего азота (мг/кг), по оси абсцисс – номера вариантов опыта из табл. 2

[Fig. 1.] The content of alkaline hydrolysable nitrogen in the soil by the 42nd day of the experiment (mean and standard deviation). The ordinate axis shows the content of alkaline hydrolysable nitrogen (mg/kg), the abscissa axis shows the numbers of the experiment variants from Table 2]

Ожидалось, что увеличение содержания в почве доступного для растений азота должно привести к улучшению роста растений. Однако корреляционная зависимость между числом выживших растений и содержанием щелочногидролизуемого азота оказалась слабой и обратной ($r = -0,36$, $p = 0,165$), правильнее, пожалуй, говорить об ее отсутствии.

Внесение минеральных азотных удобрений в дозах действующего вещества от 0,1 до 0,3 г/кг почвы привело к статистически значимому подкислению актуальной реакции среды дерново-подзолистой почвы до слабокислой и кислой (рис. 2).

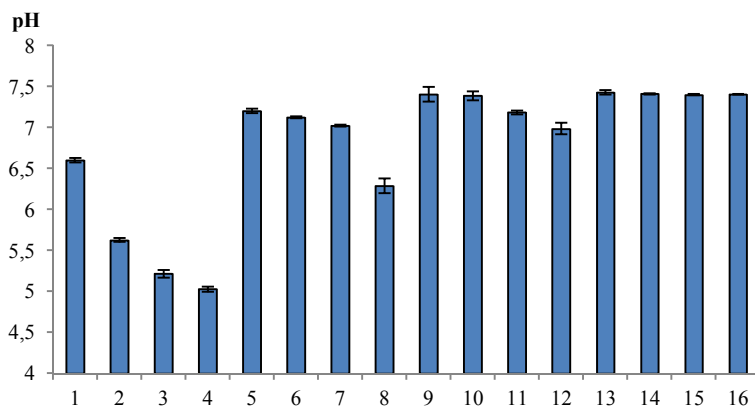


Рис. 2. Реакция среды водной вытяжки из почвы на 42-й день опыта (среднее и стандартные отклонения). По оси ординат – pH водной вытяжки, по оси абсцисс – номера вариантов опыта из табл. 2

[Fig. 2. There reaction of the water extract from the soil on the 42nd day of the experiment (mean and standard deviations). The ordinate shows the pH of the water extract, the abscissa shows the numbers of the experiment options from Table 2]

Внесение биоугля, наоборот, привело к статистически значимому подщелачиванию реакции среды водной вытяжки, но при этом она оставалась в градациях нейтральной и слабощелочной (рис. 2). При совместном внесении подщелачивающий эффект биоугля уменьшался с увеличением дозы азотных удобрений.

Зависимости между числом выживших растений и реакцией среды обнаружено не было: $r = -0,004$, $p = 0,987$.

Проведенные исследования позволили установить, что на 42-й день опыта общее микробное число (ОМЧ), по которому обычно судят о микробиологической активности почвы, возрастало с повышением концентрации вносимого биоугля, даже если биоуголь вносился без азотных удобрений. Полученный результат согласуется с данными Е.Я. Рижей с соавт. о том, что внесение биоугля в почву способствует усилению микробиологической деятельности [12]. При внесении 5% биоугля ОМЧ увеличивалось в два раза по сравнению с контролем, 10% – в 4,5 раза (табл. 3).

Внесение минеральных азотных удобрений без биоугля не привело к статистически значимому изменению численности микроорганизмов (табл. 3). Возможно, это связано с тем, что аммонификаторы используют в основном азот органических соединений. На всех вариантах опыта, кроме вариантов с минеральными удобрениями без биоугля, численность микроорганизмов статистически значимо выше, чем на контроле.

Т а б л и ц а 3 [Table3]

**Численность трофических групп микроорганизмов на 42-й день опыта
(среднее $\pm$ стандартное отклонение)**

[The number of trophic groups of microorganisms on the 42nd day of the experiment (mean $\pm$ standard deviation)]

Вариант опыта [Experiment variant]	Общее микробное число, 10 ⁶ КОЕ/г [Total microbial number, 10 ⁶ CFU/g]	Амилолитики, 10 ⁵ КОЕ/г [Amylolitics, 10 ⁵ CFU/g]	Актиномицеты, 10 ⁵ КОЕ/г [Actinomycetes, 10 ⁵ CFU/g]	Микромицеты, 10 ³ КОЕ/г [Micromycetes, 10 ³ CFU/g]
Контроль (почва) [Control (soil)]	30,2 $\pm$ 6,4	152,6 $\pm$ 24,9	37,2 $\pm$ 1,7	26,4 $\pm$ 1,7
0,1 г N/kg почвы [0.1 g N/kg soil]	109,7 $\pm$ 41,5	146,8 $\pm$ 19,8	38,6 $\pm$ 3,4	91,0 $\pm$ 5,0*
0,2 г N / кг почвы [0.2 g N/kg soil]	14,6 $\pm$ 3,2	29,1 $\pm$ 4,0	8,6 $\pm$ 1,0*	37,0 $\pm$ 4,4
0,3 г N / кг почвы [0.3 g N/kg soil]	28,0 $\pm$ 7,8	40,8 $\pm$ 5,9*	11,6 $\pm$ 0,9*	36,7 $\pm$ 3,7*
2% биоугля [2% biochar]	50,7 $\pm$ 2,8*	162,0 $\pm$ 6,9	29,8 $\pm$ 2,6*	42,1 $\pm$ 2,4*
2% биоугля + 0,1 г N [2% biochar + 0.1 g N]	98,4 $\pm$ 9,1*	276,1 $\pm$ 24,4*	54,7 $\pm$ 4,7*	36,7 $\pm$ 3,6
2% биоугля + 0,2 г N [2% biochar + 0.2 g N]	88,0 $\pm$ 13,2*	174,1 $\pm$ 31,8	30,0 $\pm$ 5,0	53,7 $\pm$ 3,8*
2% биоугля + 0,3 г N [2% biochar + 0.3 g N]	120,2 $\pm$ 12,7*	289,3 $\pm$ 23,4*	40,2 $\pm$ 4,1	73,7 $\pm$ 12,4*
5% биоугля [5% biochar]	40,4 $\pm$ 2,6*	192,6 $\pm$ 10,2	79,2 $\pm$ 11,0*	38,8 $\pm$ 2,6*
5% биоугля + 0,1 г N [5% biochar + 0.1 g N]	115,3 $\pm$ 27,5*	290,3 $\pm$ 25,9*	57,3 $\pm$ 3,4*	39,9 $\pm$ 2,1*
5% биоугля + 0,2 г N [5% biochar + 0.2 g N]	136,2 $\pm$ 24,1*	328,0 $\pm$ 44,2*	81,3 $\pm$ 8,0*	68,5 $\pm$ 2,6*
5% биоугля + 0,3 г N [5% biochar + 0.3 g N]	96,4 $\pm$ 4,4*	341,2 $\pm$ 47,1*	51,9 $\pm$ 8,0	32,4 $\pm$ 4,4
10% биоугля [10% biochar]	139,9 $\pm$ 19,6*	220,7 $\pm$ 58,0	105,2 $\pm$ 17,6*	258,3 $\pm$ 9,0*
10% биоугля + 0,1 г N [10% biochar + 0.1 g N]	299,7 $\pm$ 79,1*	328,8 $\pm$ 26,0*	112,9 $\pm$ 1,7*	44,7 $\pm$ 4,4*
10% биоугля + 0,2 г N [10% biochar + 0.2 g N]	327,8 $\pm$ 56,3*	166,1 $\pm$ 18,5	63,7 $\pm$ 18,4	137,4 $\pm$ 14,4*
10% биоугля + 0,3 г N [10% biochar + 0.3 g N]	441,5 $\pm$ 126,5*	300,8 $\pm$ 21,9*	158,2 $\pm$ 26,5*	61,1 $\pm$ 5,3*

* Статистически значимая разница с контролем (тест Стьюдента) [Statistically significant difference with the control (Student's test)].

Совместное внесение биоугля и азотных удобрений приводило к более значительной стимуляции численности ОМЧ. Максимальная отмечена для самой большой концентрации биоугля и самой высокой дозы минеральных удобрений (10% биоугля и 0,3% N на 1 кг почвы). По-видимому, это связано как с большой удельной поверхностью биоугля, являющейся местом поселения микроорганизмов, так и с дополнительным поступлением с биоуглем азотсодержащих органических соединений. Коэффициент корреляции между численностью аммонифицирующих микроорганизмов и содержанием щелочногидролизуемого азота составил $r = 0,65$ ($p = 0,006$), что свидетельствует о прямой связи средней силы между признаками.

Однако высокая общая численность микроорганизмов – не всегда показатель плодородия почв. Наоборот, изменение микробиологических показателей более, чем на 50% от контроля, часто служит показателем неблагополучия или временной нестабильности почвенной экосистемы [18]. В нашем случае на вариантах с самой высокой микробиологической активностью наблюдалось наименьшее количество выживших растений. Корреляционная зависимость между числом выживших растений и ОМЧ оказалась средней и обратной ($r = -0,53$, $p = 0,033$).

Численность амилотических микроорганизмов, ассимилирующих минеральные формы азота, при внесении в почву биоугля без удобрений статистически значимо от контроля не отличалась (тест Стьюдента, $p < 0,05$), что подтверждает недостаток минерального азота в биоугле. При внесении в почву минеральных азотных удобрений в количестве 0,2–0,3 г/кг численность амилотиков уменьшилась в 3,5–4,5 раза (см. табл. 3). По-видимому, даже для таких микроорганизмов доза минерального азота оказалась чрезмерной. Совместное внесение биоугля и азотных удобрений способствовало увеличению численности амилотических микроорганизмов по сравнению с контролем.

Актиномицеты – одна из групп микроорганизмов, относящихся к амилотическим, но часто изучаемых отдельно. Изменения их численности под воздействием внесения биоугля и минеральных удобрений в почву в целом совпадали с закономерностями, отмеченными для амилотиков (табл. 3). Коэффициент корреляции между численностью актиномицетов и содержанием щелочногидролизуемого азота равен 0,53 ($p = 0,033$), т.е. зависимость между признаками средняя.

Численность микроскопических грибов (микромикетов), способных разлагать трудноразлагаемые органические вещества почв, была выше, чем на контроле, на всех вариантах опыта, в том числе с внесением минеральных удобрений (табл. 2). По-видимому, это объясняется тем, что к 42-му дню опыта в вегетационных сосудах имелось достаточное количество корневой и микробной биомассы, пригодной для разложения, а также органических соединений, поступивших вместе с углем. Самая высокая численность микромикетов отмечалась при внесении в почву 10% биоугля без минеральных удобрений. Полученные данные согласуются с данными Е.Я. Рижей с соавт., которые отмечали, что биоуголь стимулирует развитие почвенных плесневых грибов [12].

Корреляционной зависимости между численностью амилаolitikов, актиномицетов, микромицетов и числом выживших растений обнаружено не было.

Коэффициент минерализации/иммобилизации, по Е.Н. Мишустину, во всех случаях оказался меньше единицы, что свидетельствует о преобладании процессов минерализации в почвах вегетационного опыта. Коэффициент корреляции между содержанием щелочногидролизующего азота и коэффициентом минерализации оказался равен $-0,59$ ($p = 0,014$), что свидетельствовало о средней обратной зависимости между признаками. Чем больше в почве щелочногидролизующего азота, тем сильнее проявляются процессы минерализации.

Таким образом, внесение биоугля и особенно биоугля с минеральными азотными удобрениями привело к всплеску численности почвенных микроорганизмов и усилению процессов минерализации азота. Полученные результаты свидетельствуют о том, что к 42-му дню опыта микробное сообщество почвы еще не вернулось в равновесное состояние. Для выявления отдаленных последствий требуются более длительные исследования.

Проведенные исследования позволили установить, что активность ферментов уреазы и каталазы имела сильную прямую взаимосвязь с количеством внесенного биоугля – коэффициент корреляции соответственно $0,84$ ($p < 0,001$) и $0,95$ ($p < 0,001$). В то же время внесение в почву только минеральных удобрений привело к уменьшению активности ферментов (табл. 4).

Т а б л и ц а 4 [Table 4]

**Ферментативная активность почв на 42-й день опыта
(среднее $\pm$ стандартное отклонение)**

[Enzymatic activity of soils on the 42nd day of the experiment (mean $\pm$ standard deviation)]

Вариант опыта [Experiment variant]	Уреазы N, мкг/г в час [Urease N, mcg/g per hour]	Каталаза, мл O ₂ /г почвы в минуту [Catalase, ml O ₂ /g soil per minute]	Инвертаза, мг глюкозы/г почвы за 4 ч [Invertase, mg glucose/g soil for 4 hours]
Контроль (почва) [Control (soil)]	12,4 $\pm$ 1,2	0,448 $\pm$ 0,019	0,30 $\pm$ 0,003
0,1 г N/кг почвы [0.1 g N/kg soil]	6,9 $\pm$ 0,5*	0,364 $\pm$ 0,019*	0,13 $\pm$ 0,001*
0,2 г N/кг почвы [0.2 g N/kg soil]	6,9 $\pm$ 0,5*	0,168 $\pm$ 0,011*	0,21 $\pm$ 0,001*
0,3 г N/кг почвы [0.3 g N/kg soil]	11,9 $\pm$ 1,4	0,280 $\pm$ 0,024*	0,25 $\pm$ 0,007*
2% биоугля [2% biochar]	19,9 $\pm$ 1,3*	0,504 $\pm$ 0,019	0,22 $\pm$ 0,014*
2% биоугля + 0,1 г N [2% biochar + 0.1 g N]	11,9 $\pm$ 1,4*	0,476 $\pm$ 0,001	0,24 $\pm$ 0,021
2% биоугля + 0,2 г N [2% biochar + 0.2 g N]	22,5 $\pm$ 1,0*	0,476 $\pm$ 0,001	0,21 $\pm$ 0,004*
2% биоугля + 0,3 г N [2% biochar + 0.3 g N]	16,6 $\pm$ 2,2	0,420 $\pm$ 0,039	0,22 $\pm$ 0,014*
5% биоугля [5% biochar]	25,6 $\pm$ 2,8*	0,630 $\pm$ 0,009*	0,19 $\pm$ 0,003*

Вариант опыта [Experiment variant]	Уреаза N, мкг/г в час [Urease N, mcg/g per hour]	Каталаза, мл O ₂ /г почвы в минуту [Catalase, ml O ₂ /g soil per minute]	Инвертаза, мг глюкозы/г почвы за 4 ч [Invertase, mg glucose/g soil for 4 hours]
5% биоугля + 0,1 г N [5% biochar + 0.1 g N]	22,0±0,9*	0,616±0,039*	0,13±0,007*
5% биоугля + 0,2 г N [5% biochar + 0.2 g N]	24,0±0,7*	0,644±0,019*	0,21±0,001*
5% биоугля + 0,3 г N [5% biochar + 0.3 g N]	29,4±1,8*	0,588±0,019*	0,10±0,001*
10% биоугля [10% biochar]	32,1±1,9*	0,784±0,039*	0,13±0,003*
10% биоугля + 0,1 г N [10% biochar + 0.1 g N]	64,2±4,6*	0,896±0,039*	0,14±0,024*
10% биоугля + 0,2 г N [10% biochar + 0.2 g N]	30,7±2,3*	0,840±0,010*	0,17±0,003*
10% биоугля + 0,3 г N [10% biochar + 0.3 g N]	35,4±4,2*	0,952±0,039*	0,16±0,011*

* Статистически значимая разница с контролем (тест Стьюдента) [Statistically significant difference with the control (Student's test)].

Активность каталазы не претерпела статистически значимых изменений по сравнению с контролем только при внесении минимальной дозы биоугля – 2%, независимо от того, вносились вместе с ним удобрения или нет.

Активность уреазы возрастала статистически значимо по сравнению с контролем при внесении 2, 5 и 10% биоугля, а при внесении только минеральных удобрений – уменьшалась. Максимальная активность инвертазы наблюдалась на контроле, а при внесении биоугля уменьшалась. Взаимосвязь активности фермента инвертазы с количеством внесенного биоугля оказалась отрицательной ($r = -0,61, p = 0,013$).

Данные ферментативной активности почв, отклоняющиеся более чем на 25%, от контроля свидетельствовали об изменении состояния почвенной экосистемы при внесении биоугля [16].

Корреляционной зависимости между активностью ферментов и числом выживших растений овса посевного обнаружено не было.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что дозы азотных удобрений и биоугля, а также их взаимодействие статистически значимо влияли на число живых растений на 42-й день эксперимента, итоговое содержание щелочногидролизующего азота в почве, кислотность почвы, содержание амилотических микроорганизмов и микромицетов, а также на все параметры ферментативной активности почв (табл. 5). На общее микробное число значимое влияние оказывала только концентрация вносимого биоугля. На содержание актиномицетов значимое влияние оказывала в первую очередь концентрация биоугля; азотные удобрения – только при совместном внесении с биоуглем.

Т а б л и ц а 5 [Table 5]

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа
[Results of the two-way analysis of variance]

Показатель	Фактор [Factor]			
	N	Биоуголь [Biochar]	N : Биоуголь [N : Biochar]	Остатки [Residuals]
Df	3	3	9	48
Число живых растений [Number of living plants]	7,3**	2,9**	4,2**	0,6
Щелочногидролизуемый азот [Alkaline Hydrolysable Nitrogen]	958**	2588**	561**	26,2
pH водной вытяжки [pH of water extract]	1,53**	10,54**	0,44**	0,00
Общее микробное число [Total microbial count]	–	156480**	–	11952
Амилолитики [Amylolitics]	22 390**	88 046**	11 444*	4857
Актиномицеты [Actinomycetes]	1 085	17 224**	1 760*	0,3
Микромицеты [Micromycetes]	4 391**	18 013**	9 402**	229
Уреаза [Urease]	121**	2728**	332**	32
Каталаза [Catalase]	0,009**	0,666**	0,018**	0,001
Инвертаза [Invertase]	0,009*	0,666**	0,018**	0,001

* и ** значимо при $p < 0,05$ и $p < 0,01$ соответственно [* and ** significant at $p < 0,05$ and $p < 0,01$, respectively].

Заключение

Внесение в бедную песчаную дерново-подзолистую почву биоугля из илов сточных вод, как самостоятельно, так и совместно с минеральными азотными удобрениями, привело к увеличению числа выживших растений овса посевного к 42-му дню опыта по сравнению с контролем. Наилучший результат получен при дозе биоугля 10% от веса почвы без добавления минеральных удобрений.

Средняя высота и биомасса растений на всех вариантах к 42-му дню опыта статистически значимо не отличалась от контроля.

Внесение биоугля и минеральных азотных удобрений в исследованных дозах привело к увеличению содержания щелочногидролизуемого азота в почве.

При совместном внесении подщелачивающий эффект биоугля уменьшался с увеличением дозы азотных удобрений.

Биологическая активность почвы наиболее высока при совместном внесении максимальных доз биоугля и азотных удобрений, хотя двухфакторный дисперсионный анализ показал, что значимое влияние на общую численность микроорганизмов оказывала только концентрация вносимого биоугля.

Совместное и раздельное внесение биоугля и минеральных удобрений, согласно результатам двухфакторного дисперсионного анализа, оказало значимое воздействие на число выживших растений, численность амилолитических микроорганизмов и микромицетов, активность ферментов инвертазы, каталазы и уреазы в почве.

Между общей численностью микроорганизмов и числом выживших растений овса посевного в почве обнаружена обратная корреляционная зависимость средней силы. Взаимосвязь между числом выживших растений и численностью других трофических групп микроорганизмов, а также активностью ферментов, не обнаружена.

Список источников

1. Дьяков М.С., Вайсман Я.И. Оценка перспективных и конкурентоспособных направлений переработки осадков коммунальных сточных вод // *Экология и промышленность России*. 2017. Т. 21, № 7. С. 36–41. doi: 10.18412/1816-0395-2017-7-36-41
2. Сердюк Ю.О., Цыбина А.В. Анализ общемировых тенденций развития технологий утилизации осадков сточных вод // *Химия. Экология. Урбанистика : материалы конф.* Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. С. 117–121.
3. Ручкинова О.И., Зверева А.Н. Методы утилизации осадков городских очистных сооружений // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2020. Т. 1. С. 192–196.
4. Hunt J., Du Ponte M., Sato D., Kawabata A. The Basics of Biochar: A Natural Soil Amendment // *Soiland Crop Management*. 2010. SCM-30. PP. 1–2.
5. Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А. Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2020. № 3. С. 31–44. doi: 10.17076/eb1087
6. Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Иванова Т.Г., Попеня М.В., Войникова Е.В. Характеристики дерново-подзолистых почв после внесения биоугля // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук*. 2015. № 2. С. 87–94.
7. Брындына Л.В., Бакланова О.В. Восстановление почвы после гербицидного загрязнения с помощью биочара из осадков сточных вод и опилок // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25, № 6. С. 32–37. doi: 10.18412/1816-0395-2021-6-32-37
8. Liu T., Liu B., Zhang W. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2014. Vol. 23, № 1. PP. 271–275.
9. Song D., Xue X.Y., Chen D.Z., He P.J., Dai X.H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation // *Chemosphere*. 2014. Vol. 109. P. 213–220. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.070
10. Waqas M., Khan S., Qing H., Brian R., Cai C. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAH and potentially toxic element bioaccumulation in *Cucumis sativa* L. // *Chemosphere*. 2013. Vol. 105. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.064
11. Рязанов С.С., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Хайруллина А.М. Содержание тяжелых металлов в растениях при внесении различных видов биоуглей в серую лесную почву // *Российский журнал прикладной экологии*. 2020. № 3 (23). С. 29–34. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10023
12. Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С. Балашов Е.В. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // *Почвоведение*. 2015. № 2. С. 211–220. doi: 10.7868/S0032180X14120089
13. Schulz H., Glaser B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2012. Vol. 175. PP. 410–422.
14. Ábrego J., Atienza-Martínez M., Gimeno J.R., Aibar J., Quílez D., Gea G. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition // *23rd European Biomass Conference and Exhibition*. Vienna, Austria, 2015.

15. Классификация и диагностика почв СССР. М : Колос, 1977. 221 с.
16. IUSS Working Group WRB. World Reference Base of Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome : FAO, 2015. 192 p.
17. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М. : Наука, 2005. 252 с.
18. Глинушкин А.П., Соколов М.С., Торопова Е.Ю. Фитосанитарные и гигиенические требования к здоровой почве. М. : Агрорус, 2016. 288 с.

References

1. D'jakov MS, Vajsman JaI. Evaluation of Promising and Competitive Areas of Municipal Waste Water Recycling. *Jekologija i promyshlennost' Rossii - Ecology and Industry of Russia*. 2017; 21(7):36-41. In Russian. doi.org/10.18412/1816-0395-2017-7-36-41
2. Serdjuk JuO, Cybina AV. Analiz obshhemirovyh tendencij razvitiya tehnologij utilizacii osadkov stochnyh vod [Analysis of global trends in the development of wastewater sludge disposal technologies]. *Himija. Jekologija. Urbanistika*. Perm: Perm national research polytechnic university Publ.; 2017:117-121. In Russian.
3. Ruchkinova OI, Zvereva AN. Metody utilizatsii osadkov gorodskikh ochistnykh sooruzheniy [Methods of utilization of sludge from urban wastewater treatment plants]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika -Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2020; 1:192-196. In Russian.
4. Hunt J, Du Ponte M, Sato D, Kawabata A. The Basics of Biochar: A Natural Soil Amendment. *Soiland Crop Management*. 2010. SCM-30:1-2.
5. Dubrovina IA, Yurkevich MG, Sidorova VA. Effect of biochar and fertilizers on the development of barley plants and agrochemical indices of soddy-podzolic soils in a pot experiment. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN - Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2020; 3: 31-44. In Russian. doi: 10.17076/eb1087
6. Sokolik GA, Ovsyannikova SV, Ivanova TG, Popenya MV, Voynikova EV. Characteristics of sod podzol soils after biochar application. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*. 2015; 2:87-94. In Russian.
7. Bryndina LV, Baklanova OV. Restoration of Soil from Herbicide Pollution using Biochar from Sewage Sludge and Sawdust. *Jekologija i promyshlennost' Rossii - Ecology and Industry of Russia*. 2021; 25(6):32-37. In Russian. doi: 10.18412/1816-0395-2021-6-32-37
8. Liu T, Liu B, Zhang W. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2014; 23(1):271-275.
9. Song D, Xue XY, Chen DZ, He PJ, Dai XH. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation. *Chemosphere*. 2014; 109: 213-220. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.070
10. Waqas M, Khan S, Qing H, Brian R, Cai C. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAH and potentially toxic element bioaccumulation in *Cucumis sativa* L. *Chemosphere*. 2013; 105. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.064
11. Ryazanov SS, Grachev AN, Kulagina VI, Khayrullina AM. Heavy metals content in plants after an application of different tyhes of biochar into the grey forest soil. *Russian Journal of Applied Ecology*. 2020; 3(23): 29-34. In Russian. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10023
12. Rizhiya EY, Buchkina NP, Mukhina IM, Belinets AS, Balashov EV. Effect of biochar on the properties of loamy sand spodosol soil samples with different fertility levels: a laboratory experiment. *Eurasian Soil Science*. 2015;48(2):192-200. doi: 10.1134/s1064229314120084.

13. Schulz H, Glaser B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2012;175: 410–422.
14. Ábrego J, Atienza-Martínez M, Gimeno JR, Aibar J, Quílez D, Gea G. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition. *23rd European Biomass Conference and Exhibition*. Vienna, Austria, 2015. [Electronic resource]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/278031095_Phytotoxicity_of_sewage_sludge_biochars_prepared_at_different_pyrolysis_conditions (accessed 20.01.2022).
15. Klassifikacija i diagnostika pochv SSSR [Classification and diagnostics of soils of the USSR]. Moscow: Kolos, 1977. 221 p. In Russian.
16. IUSS Working Group WRB. World Reference Base of Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO, 2015. 192 p.
17. Haziev FH. Metody pochvennoj jenzimologii [Methods of soil enzymology]. Moscow: Nauka, 2005. 252 p. In Russian.
18. Glinushkin AP, Sokolov MS, Toropova EJu. Fitosanitarnye i gigienicheskie trebovaniya k zdorovoj pochve [Phytosanitary and hygienic requirements for healthy soil]. Moscow: Agorus, 2016. 288 p. In Russian.

Информация об авторах:

Кулагина Валентина Ивановна – канд. биол. наук, в.н.с. лаборатории экологии почв, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (Казань, Россия).

E-mail: viksoil@mail.ru

Грачев Андрей Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры химической технологии древесины, Казанский национальный исследовательский технологический университет (Казань, Россия).

E-mail: energolesprom@gmail.com

Шагидуллин Рифгат Роальдович – член-корреспондент АН РТ, д-р хим. наук, директор Института проблем экологии и недропользования АН РТ (Казань, Россия).

E-mail: shagidullin_r@mail.ru

Сунгатуллина Люция Мансуровна – с.н.с. лаборатории экологии почв, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (Казань, Россия).

E-mail: sunlyc@yandex.ru

Рязанов Станислав Сергеевич – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории экологии почв, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ (Казань, Россия).

E-mail: RStanislav.soil@yandex.ru

Забелкин Сергей Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии древесины, Казанский национальный исследовательский технологический университет (Казань, Россия).

E-mail: szabelkin@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Valentina I. Kulagina, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Soil Ecology, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences (Kazan, Russian Federation).

E-mail: viksoil@mail.ru

Andrey N. Grachev, Dr. Sci. (Technology), Professor, Department of Chemical Technology of Wood, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russian Federation).

E-mail: energolesprom@gmail.com

Rifgat R. Shagidullin, Dr. Sci. (Chemistry), Corresponding Member, Tatarstan Academy of Sciences, Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences (Kazan, Russian Federation).

E-mail: shagidullin_@mail.ru

Lutsia M. Sungatullina, Senior Researcher, Laboratory of Soil Ecology, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences (Kazan, Russian Federation).

E-mail: sunlyc@yandex.ru

Stanislav S. Ryazanov, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Soil Ecology, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Science (Kazan, Russian Federation).

E-mail: RStanislav.soil@yandex.ru

Sergey A. Zabelkin, Cand. Sci. (Technology), Associate Professor, Department of Chemical Technology of Wood, Kazan National Research Technological University (Kazan, Russian Federation).

E-mail: szabelkin@gmail.com

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 28.07.2022;
одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 02.08.2023.*

*The article was submitted 28.07.2022;
approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 02.08.2023.*