

Научная статья

УДК 66.092-977: 631.879

DOI 10.24888/2541-7835-2023-29-68-75

БИОУГЛИ: МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ, ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕЛИОРАЦИИ

Дрягина Алина Александровна¹, Пономарев Константин Олегович^{2✉},
Кремлева Татьяна Анатольевна³, Петухов Александр Сергеевич⁴

^{1,2,3,4} Тюменский государственный университет, Тюменская область, Тюмень, Россия

¹ a.a.driagina@utmn.ru

² k.o.ponomarev@utmn.ru✉

³ t.a.kremleva@utmn.ru

⁴ a.s.petukhov@utmn.ru

Аннотация. Статья посвящена оценке микроэлементного состава (кислоторастворимых и подвижных форм тяжелых металлов) биоуглей, полученных в процессе пиролиза при 600 °С разного вида сырья, характерного для Западной Сибири. В условиях Тюменской области установлено, что в качестве мелиорантов почвы целесообразно использовать биоугли из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота и пшеничной соломы. Эти биоугли содержат минимальное количество (значительно ниже ПДК) токсичных тяжелых металлов и большее количество питательных элементов в высоких концентрациях (например, в биоугле из соломы концентрация Si составляла 1817 мг/кг, что в 7 раз больше, чем в биоуглях из других органических отходов) для растений по сравнению с биоуглями из скорлупы кедровых орехов и сосновых опилок, а значит наиболее эффективны с точки зрения повышения качества почвы. Результаты исследований показали, что во всех исследуемых биоуглях концентрации наиболее токсичных элементов (свинца и кадмия) минимальны. На основании полученных результатов сформулирована гипотеза о том, что биоугли из разного органического сырья, доминирующего в Западной Сибири, не токсичны и не нанесут вреда почве, в которую они будут внесены в качестве мелиорантов.

Ключевые слова: биоуголь, пиролиз, органические отходы, микроэлементный состав, тяжелые металлы.

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания № FEWZ-2021-0014 (Научно-технические основы и прикладные решения комплексной энерготеплотехнологической переработки биомассы для обеспечения экологически чистых технологий в энергетике и металлургии).

Для цитирования: Биоугли: микроэлементный состав, перспективы использования в мелиорации / А.А. Дрягина, К.О. Пономарев, Т.А. Кремлева, А.С. Петухов // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 3(29). С. 68-75. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-68-75>.

Original article

BIOCHAR: MICROELEMENT COMPOSITION, PROSPECTS FOR USE IN MELIORATION

Alina A. Dryagina¹, Konstantin O. Ponomarev^{2✉}, Tatyana A. Kremleva³,
Alexander S. Petukhov⁴

^{1,2,3,4} Tyumen State University, Tyumen region, Tyumen, Russia

¹ a.a.driagina@utmn.ru

² k.o.ponomarev@utmn.ru✉

³ t.a.kremleva@utmn.ru

⁴ a.s.petukhov@utmn.ru

Abstract. The article is devoted to the assessment of the microelement composition (heavy metals acid-soluble and mobile forms) of biochars produced by slow pyrolysis at 600 °C of various types of raw mate-

rials, typical for Western Siberia. In the Tyumen region conditions it was found that it is advisable to use biochars from the waste products of cattle and wheat straw as soil ameliorants. These biochars contain a minimal amount (well below the MPC) of toxic heavy metals and a greater amount of nutrients in high concentrations (for example, in biochar from straw, the concentration of Si was 1817 mg/kg, which is 7 times more than in biochars from other organic waste) for plants compared to biochars from pine nut shells and pine sawdust, and therefore the most effective in terms of improving soil quality. The research results showed that in all the biochars studied, the concentrations of the most toxic elements (lead and cadmium) are minimal. Based on the results obtained, a hypothesis was formulated that biochars from various organic raw materials that dominate in Western Siberia are non-toxic and will not harm the soil into which they will be introduced as ameliorants.

Keywords: biochar, pyrolysis, organic waste, microelement composition, heavy metals.

Funding: the work was carried out with the financial support of State Assignment No. FEWZ-2021-0014 (Scientific and technical foundations and applied solutions for integrated energy-thermotechnological processing of biomass to ensure environmentally friendly technologies in energy and metallurgy).

For citation: Biochar: microelement composition, prospects for use in melioration. A.A. Dryagina, K.O. Ponomarev, T.A. Kremleva, A.S. Petukhov. *Agro-industrial technologies of Central Russia*, 2023, no. 3(29), pp. 68-75. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-29-68-75>.

Введение

Более сорока химических элементов таблицы Д.И. Менделеева относят к тяжелым металлам, т.е. к особо загрязняющим веществам. Как следствие, важное значение имеют многочисленные наблюдения за этими элементами во всех природных средах, в частности, в почве, как основной среде их аккумуляции [4]. Количество тяжелых металлов в почве изменяется при загрязнениях, вызванных природными или антропогенными факторами или при внесении в нее различных удобрений и добавок. Одним из вариантов добавок, вносимых в почву с целью улучшения ее свойств, является биоуголь – термически переработанная биомасса [3]. Применение биоугля с изучением его характеристик является актуальной тематикой исследований, что подтверждается растущим интересом научного сообщества, вызванным его уникальными свойствами (он увеличивает содержание органического вещества в почве, рН и водоудерживающую способность почвы, доступность питательных веществ, а также смягчает последствия изменения климата за счет секвестрации углерода) [5, 12]. Но в биоугольном мелиоранте, как и в органическом сырье, содержится ряд токсичных тяжелых металлов (например, Zn, Cu, Cd, Hg и As), на которые исследователи [13, 17] обращают пристальное внимание и рекомендуют сводить концентрации этих элементов к минимуму. Например, в [8] рекомендовано проявлять осторожность в отношении таких почвенных добавок, как осадок сточных вод, которые приводят к потенциальному риску фитотоксичности почв тяжелыми металлами, даже при их обработке бентонитом, вермикулитом или биоуглем. Целесообразнее термически перерабатывать такое сырье в биоуголь. Известно [15], что содержание биодоступных тяжелых металлов в биоугле из осадков сточных вод ниже, чем в сырье до переработки. В биоугле из отходов животноводства концентрация токсичных тяжелых металлов низкая (<0,01 мг/кг) [17]. Но внесение высоких доз такого биоугля в почву показало [17] фитотоксичность почвы, которая проявлялась в значительном снижении производимой биомассы.

Таким образом, важно знать концентрации токсичных тяжелых металлов в биоуглях, используемых в качестве мелиоранта-удобрения почвы, так как это существенно влияет на плодородие почвы и урожайность культур. Концентрация тяжелых металлов может изменяться в больших диапазонах в зависимости от региона и присущего ему органического сырья. Также в биоуглях присутствуют и питательные микроэлементы, необходимые для развития растений [9]. Так как каждый из химических элементов необходим растениям в небольших дозах, то их дефицит или избыток может серьезно повлиять на качество растений и скорость их роста. В биоуглях даже из одного региона, но из разных органических отходов, эти концентрации могут существенно отличаться [10, 11, 14]. По этой причине крайне важно определять микроэлементный состав (как токсичных, так и питательных элементов) биоуг-

лей, в том числе из разного органического сырья, типичного для определенных территорий, чтобы обеспечить использование соответствующего мелиоранта для конкретной культуры и почвенных условий.

Целью работы является определение микроэлементного состава перспективных для мелиорации почв биоуглей, полученных пиролизом характерных для Тюменской области органических отходов.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились в 2022-2023 гг. В экспериментах использовались характерные для Западной Сибири органические отходы, а именно: пшеничная солома, сосновые опилки, навоз крупного рогатого скота и скорлупа кедрового ореха. Все образцы высушивались до воздушно-сухого состояния, и затем проводилась термическая обработка сырья традиционным медленным пиролизом при 600 °С с получением биоугля. Пиролизная установка представляла собой реактор с неподвижным слоем биомассы и наружным обогревом. Полученные газы и пары выводились из реактора в процессе пиролиза, а биоуголь извлекался после завершения процесса термической переработки и остывания установки до комнатной температуры. Каждый биоуголь помещался в пластиковую тару и плотно закрывался. Микроэлементный состав биоуглей проводился методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Содержание кислоторастворимых и подвижных форм металлов в биоуглях определяли в вытяжках с использованием различных растворителей. В качестве экстрагентов использовали азотную кислоту HNO₃, буферный раствор с pH 4,8 и бидистиллированную воду. Экстракцию проводили из отдельных навесок в двукратной повторности. Далее проводилась фильтрация образцов, и полученные вытяжки анализировали на атомно-эмиссионном спектрофотометре с индуктивно-связанной плазмой PlasmaQuant PQ 9000 (Analytik Jena, Германия).

Результаты исследований и их обсуждение

В биоуглях содержатся токсичные элементы, но превышение концентраций этих элементов уровней ПДК [7] является фактором безопасного внесения мелиорантов в почву. В таблице 1 приведено содержание кислоторастворимых и подвижных форм токсичных металлов в биоуглях из органических отходов, таких как скорлупа кедровых орехов, сосновые опилки, отходы жизнедеятельности крупного рогатого скота (ОЖКС) и пшеничная солома. Установлено, что в исследуемых биоуглях практически отсутствует Cd, его содержание в кислоторастворимых и подвижных формах не превышало 0,01 мг/кг. Остальные рассматриваемые металлы, такие как Cr, Pb и Ni, в биоуглях зарегистрированы, и наибольшая концентрация их была в биоугле из соломы (табл. 1).

Таблица 1. Содержание токсичных металлов в биоуглях, мг/кг

Сырье, из которого получен биоуголь	Cr	Pb	Cd	Ni
	Кислоторастворимые формы токсичных металлов			
Скорлупа	5,321	0,109	0,005	1,388
Опилки	0,514	0,979	0,005	1,733
ОЖКС	2,520	1,657	0,005	3,861
Солома	6,802	17,980	0,005	21,450
	Подвижные формы токсичных металлов			
Скорлупа	0,300	1,569	0,010	0,710
Опилки	0,070	1,372	0,010	0,778
ОЖКС	1,477	1,667	0,010	2,315
Солома	0,160	1,168	0,010	0,729

Показано, что подвижных форм токсичных металлов в биоугле из любого вида сырья минимально. Содержание Pb в биоуглях составляло примерно 1,4-1,7 мг/кг. Наибольшее содержание Ni составляло в биоугле из ОЖКС (2,3 мг/кг), а в остальных биоуглях наблюдалось примерно одинаковое содержание 0,7 мг/кг. Количество Cr в биоугле из ОЖКС – 1,5 мг/кг, биоугле из соломы и скорлупы орехов – 0,2-0,3 мг/кг, а наименьшие концентрации наблюдались в биоуглях из опилок (0,1 мг/кг). Так как свинец и кадмий являются самыми токсичными элементами и их концентрации в исследуемых биоуглях минимальны (как, впрочем, и концентрации других элементов), то можно сказать, что биоугли из любого рассматриваемого нами вида сырья, характерного для Западной Сибири, не токсичны и не нанесут вреда почве, в которую они будут внесены.

Помимо токсичных элементов в биоуглях содержатся и питательные элементы, такие как К, Р, Са, Mg, Fe и Si, которые являются одними из самых важных с точки зрения плодородия почв элементов. Наибольшее количество кислоторастворимых и подвижных форм элементов Mg, Са, Si наблюдалось в биоуглях из ОЖКС, соломы и скорлупы орехов, содержание фосфора преобладало в биоуглях из ОЖКС и соломы (табл. 2).

Таблица 2. Содержание питательных элементов в биоуглях, мг/кг

Сырье, из которого получен биоуголь	К	Са	Р	Mg	Si	Fe
Кислоторастворимые формы токсичных металлов						
Скорлупа	2967,5	392,7	205,4	245,2	120,6	1263,7
Опилки	392,3	1064,7	38,6	173,1	278,2	259,0
ОЖКС	6114,4	10261,3	8668,6	2816,1	177,7	2329,4
Солома	6193,9	9969,1	5909,6	2697,5	1816,8	3573,2
Подвижные формы токсичных металлов						
Скорлупа	2397,6	604,5	221,8	192,7	87,0	57,9
Опилки	283,9	1106,1	31,6	97,4	87,8	15,3
ОЖКС	12463,8	18391,4	5160,2	4485,6	847,7	735,4
Солома	12143,0	6573,8	731,9	511,9	731,9	51,4

Наименьшие концентрации этих элементов зарегистрированы у опилок (например, кислоторастворимой формы фосфора в ОЖКС в 225 раз больше, чем в опилках, а калий превышен в 15,6 раз (табл. 2).

Также в исследуемых биоуглях определены не менее важные элементы [2], такие как Mg, Са и Si (табл. 2). Наибольшее количество кислоторастворимых и подвижных форм металлов Mg, Са, Si наблюдалось (табл. 2) в биоуглях из ОЖКС и соломы, по сравнению с биоуглями из скорлупы орехов и опилок. При сравнении биоуглей из ОЖКС и опилок наблюдалось значительное превышение концентраций кислоторастворимых форм микроэлементов в первом биоугле: кальция в ОЖКС примерно в 10 раз больше чем в опилках, а магния в 16 раз (табл. 2). При этом подвижных форм металлов в биоугле из ОЖКС также значительно больше, чем в других биоуглях (табл. 2). Так как рассмотренные микроэлементы являются важными питательными веществами и влияют на рост и здоровье растений [2], то можно отметить, что биоуголь из ОЖКС обладает большими агрономическими преимуществами по сравнению с биоуглями из других видов сырья.

Также установлено, что концентрация Mg в биоуглях из ОЖКС и соломы составляла 2757 мг/кг (+/-3%) (табл. 2). При этом стоит отметить, что в биоугле из соломы концентрация Si составляла 1817 мг/кг, что в 7 раз больше, чем в биоуглях из других органических отходов. Так как кремний (Si) полезен для растений, поскольку повышает эффективность фотосинтеза и смягчает биотические и абиотические стрессы [14], то биоуголь из соломы может служить источником кремния с его медленным высвобождением, в то время как биоуголь с дефицитом кремния может быть дополнительным поглотителем его в субстрате [1, 16].

На основании полученных результатов также можно сделать вывод о том, что биоугли из ОЖКС и соломы содержат высокие концентрации щелочных элементов К, Са и Mg, а значит могут быть использованы для раскисления почв [18]. Однако в биоуглях помимо выше представленных питательных микроэлементов также присутствуют и другие элементы, например, железо (Fe), которое необходимо почве в определенных концентрациях. Известно [6], что такого элемента, как железо не хватает почвам с большим содержанием песка, т.е. типичным для Тюменской области и характеризующимся низким плодородием. А так как этот элемент и другие рассмотренные превалируют в биоуглях из ОЖКС и соломы, то именно эти биоугли предлагается использовать, как наиболее эффективные с точки зрения повышения качества почвы.

Выводы

1. Обеспечение рационального землепользования в Западной Сибири возможно при проведении мелиоративных мероприятий с внесением биоуглей, полученных пиролизом характерных для этой территории органических отходов. По результатам работы, определено содержание кислоторастворимых и подвижных форм металлов в биоуглях из различных, типичных для Западной Сибири органических отходов, таких как скорлупа кедровых орехов, сосновые опилки, пшеничная солома и отходы жизнедеятельности крупного рогатого скота (ОЖКС). Установлено, что биоугли из ОЖКС и соломы обладают наибольшим содержанием подвижных форм металлов (К, Са, Р, Mg, Si, Fe) по сравнению с биоуглями из опилок и соломы. В то же время биоуголь из пшеничной соломы содержал много Si, что говорит и о его потенциале как источника кремния с его медленным высвобождением.

2. Установлено, что в исследуемых биоуглях отсутствует Cd ($<0,01$ мг/кг). Остальные рассматриваемые металлы, такие как Cr, Pb и Ni в биоуглях зарегистрированы, но их концентрации значительно ниже норм ПДК. Следовательно, биоугли из характерного для Западной Сибири сырья не токсичны и не нанесут вреда почве, в которую они будут внесены.

3. По результатам экспериментальных исследований, установлено, что для характерных для Западной Сибири (в частности, Тюменской области) почв целесообразно использовать в качестве мелиорантов биоугли из отходов жизнедеятельности крупного рогатого скота (ОЖКС) и пшеничной соломы. Эти биоугли содержат большее количество питательных элементов для растений по сравнению с биоуглями из скорлупы кедровых орехов и сосновых опилок, минимальное количество (значительно ниже ПДК) токсичных тяжелых металлов, а значит более эффективны с точки зрения повышения качества почвы.

Список источников

1. Безручко Е.В. Кремний – недооцененный элемент питания растений // Земледелие. 2020. № 4. С. 40-46.

2. Власюк П.А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений. Киев: Наукова думка, 1969. 516 с.

3. Влияние биоугля на развитие яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и кислотность дерново-подзолистой почвы в Западной Сибири / К.О. Пономарев, А.Н. Первушина, К.С. Коротаева, А.А. Юртаев, А.С. Петухов, Р.Б. Табакаев, И.И. Шаненков // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. № 113. С. 110-137.

4. Леонова Ю.В., Сюняева О.И., Тютюнькова М.В. Агроэкологическая оценка применения удобрения-мелиоранта СУПРОДИТ-М на дерново-подзолистых супесчаных почвах Калужской области // Агропромышленные Технологии Центральной России. 2022. № 24 (2). С. 71-75.

5. Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) / А. В. Литвинович, А. А. М. Хаммам, А. В. Лаврищев, О. Ю. Павлова // Агрохимия. 2016. № 9. С. 39-46.

6. Неверов А.А. Стимулирующая роль микроэлементов на стадии прорастания семян ячменя // Животноводство и кормопроизводство. 2022. № 1 (105). С. 159-170.
7. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве (ГН 2.1.7.2041-06). М: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. С. 1-16.
8. Balidakis A., Matsi T., Karagianni A. G., Ipsilantis I. Soil application of sewage sludge treated with clay minerals or biochar and its effect on soil properties and white clover's (*Trifolium repens* L.) growth and arbuscular mycorrhizal fungal root colonization // *Applied Sciences* (Switzerland). 2022. No. 22 (12). Pp. 11382.
9. Buss W., Wurzer C., Manning D. A. C., E. J. Rohling, J. Borevitz, O. Mašek. Mineral-enriched biochar delivers enhanced nutrient recovery and carbon dioxide removal // *Communications Earth and Environment*. 2022. No. 1 (3). Pp. 67.
10. Carter S., Shackley S., Sohi S., Suy T. B., Haefele S. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*brassica chinensis*) // *Agronomy*. 2013. No. 2 (3). Pp. 404-418.
11. Clemente J. S., Beauchemin S., Thibault Y., Mackinnon T., Smith D.. Differentiating inorganics in biochars produced at commercial scale using principal component analysis // *ACS Omega*. 2018. No. 6 (3). Pp. 6931-6944.
12. Gonzalez Sarango E. M., Leimer S., Valarezo Manosalvas C., Wilcke W. Does biochar improve nutrient availability in Ultisols of tree plantations in the Ecuadorian Amazonia? // *Soil Science Society of America Journal*. 2022. No. 4 (86). Pp. 1072-1085.
13. Li H., Wu W., Min X., Zhan W., Fang T., Dong X., Shi Y. Immobilization and assessment of heavy metals in chicken manure compost amended with rice straw-derived biochar // *Environmental Pollutants and Bioavailability*. 2021. No 1 (33). Pp. 1-10.
14. Li Z., Delvaux B. Phytolith- rich biochar: A potential Si fertilizer in desilicated soils // *Gcb Bioenergy*. 2019. No. 11 (11). Pp. 1264-1282.
15. Lu T., Yuan H., Wang Y., Huang H., Chen Y. Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2016. No. 4 (18). Pp. 725-733.
16. Wang Y., Xiao X., Chen B. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms // *Scientific Reports*. 2018. No. 1 (8). Pp. 1-11.
17. Yang X., Li Q., Tang Z., Zhang W., Yu G., Shen Q., Zhao F. J. Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China // *Waste Management*. 2017. (64). Pp. 333-339.
18. Zielińska A., Oleszczuk P., Charnas B., Skubiszewska-Zięba J., Pasieczna-Patkowska S. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015. (112). Pp. 201-213.

References

1. Bezruchko E.V. Silicon is an underestimated plant nutrient. *Agriculture*, 2020, no. 4. pp. 40-46.
2. Vlasyuk P.A. Biological elements in the life of plants. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1969. 516 p.
3. Biochar influence on the development of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) and acidity of soddy- podzolic soil in Western Siberia. K.O. Ponomarev, A.N. Pervushina, K.S. Korotaeva, A.A. Yurtaev, A.S. Petuhov, R.B. Tabakaev, I.I. Shanenkov. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, no. 113, pp. 110-137.
4. Leonova Yu., Syunyaeva O., Tyutyunkova M. Agroecological assessment of the use of fertilizer-meliorant Suprodit-M on sod-podzolic sandy loam soils of the Kaluga region. *Agro-industrial technologies of Central Russia*, 2022, no. 24 (2), pp. 71-75.

5. The Reclamation of Fertilizing Properties and Sites of Different Size Fractions of Biochar (according to Laboratory Experiments). A.V. Litvinovich, A.A.M. Khammam, A.V. Lavrishev, O. Yu. Pavlova. *Agrochemistry*, 2016, no. 9, pp. 39-46.
6. Neverov A.A. Stimulating role of trace elements at the stage of germination of barley seeds. *Animal Husbandry and Fodder Production*, 2022, no. 1 (105), pp. 159-170.
7. Maximum permissible concentration (MPC) and tentative-permissible concentration (ODC) of chemical substances in the soil. (GN 2.1.7.2041-06). M: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2006, pp. 1-16.
8. Balidakis A., Matsi T., Karagianni A. G., Ipsilantis I. Soil application of sewage sludge treated with clay minerals or biochar and its effect on soil properties and white clover's (*Trifolium repens* L.) growth and arbuscular mycorrhizal fungal root colonization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2022, no. 22 (12). pp. 11382.
9. Buss W., Wurzer C., Manning D. A. C., E. J. Rohling, J. Borevitz, O. Mašek. Mineral-enriched biochar delivers enhanced nutrient recovery and carbon dioxide removal. *Communications Earth and Environment*, 2022, no. 1 (3), pp. 67.
10. Carter S., Shackley S., Sohi S., Suy T. B., Haefele S. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*brassica chinensis*). *Agronomy*, 2013, no. 2 (3), pp. 404-418.
11. Clemente J. S., Beauchemin S., Thibault Y., Mackinnon T., Smith D.. Differentiating inorganics in biochars produced at commercial scale using principal component analysis. *ACS Omega*, 2018, no. 6 (3), pp. 6931-6944.
12. Gonzalez Sarango E. M., Leimer S., Valarezo Manosalvas C., Wilcke W. Does biochar improve nutrient availability in Ultisols of tree plantations in the Ecuadorian Amazonia? *Soil Science Society of America Journal*, 2022, no. 4 (86), pp. 1072-1085.
13. Li H., Wu W., Min X., Zhan W., Fang T., Dong X., Shi Y. Immobilization and assessment of heavy metals in chicken manure compost amended with rice straw-derived biochar. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2021, no 1 (33), pp. 1-10.
14. Li Z., Delvaux B. Phytolith- rich biochar: A potential Si fertilizer in desilicated soils. *Gcb Bioenergy*, 2019, no. 11 (11), pp. 1264-1282.
15. Lu T., Yuan H., Wang Y., Huang H., Chen Y. Characteristic of heavy metals in biochar derived from sewage sludge. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2016, no. 4 (18), pp. 725-733.
16. Wang Y., Xiao X., Chen B. Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms. *Scientific Reports*, 2018, no. 1 (8), pp. 1-11.
17. Yang X., Li Q., Tang Z., Zhang W., Yu G., Shen Q., Zhao F. J. Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China. *Waste Management*, 2017, (64), pp. 333-339.
18. Zielińska A., Oleszczuk P., Charnas B., Skubiszewska-Zięba J., Pasieczna-Patkowska S. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, (112), pp. 201-213.

Информация об авторах

А.А. Дрягина – магистрант, лаборант-исследователь лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО);

К.О. Пономарев – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО);

Т.А. Кремлева – доктор химических наук, директор Института химии;

А.С. Петухов – аспирант, ассистент кафедры органической и экологической химии Института химии.

Information about the authors

A.A. Dryagina – Master Student, Laboratory Assistant-Researcher of the Laboratory of Resource-Efficient Technologies for the Thermal Processing Of Biomass, Institute of Ecological and Agricultural Biology (X-BIO);

K.O. Ponomarev – Candidate of Technical Science, Research Fellow of Laboratory of Resource-Efficient Technologies for Thermal Processing Of Biomass, Institute of Ecological and Agricultural Biology (X-BIO);

T.A. Kremleva – Doctor of Chemistry, Director of the Institute of Chemistry;

A.S. Petukhov – Postgraduate Student, Assistant of the Department of Organic and Ecological Chemistry, Institute of Chemistry.