УДК 613.427 DOI:10.25695/AGRPH.2021.03.04

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ НА УСВОЕНИЕ АЗОТА ЯЧМЕНЕМ ПРИ ИЗБЫТКЕ КАДМИЯ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

Е. Я. Рижия[1], Ю. Р. Искандирова[2], Т. А. Банкина[2]

[1]ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79;
[2]ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Санкт-Петербург, 16-я линия В.О., д. 29
E-mail: alenarizh@yahoo.com

Поступила в редакцию 23 августа 2021 г., принята к печати 30 августа 2021 г.

Для снижения негативного влияния на живые организмы избыточного количества тяжелых металлов (ТМ), содержащихся в сельскохозяйственных почвах, разработаны различные технологические приемы и методы их детоксикации. В почву вносятся различные цеолиты, минералы, синтетические вещества и компосты, позволяющие снизить токсическое воздействие ТМ на окружающую среду. В последние годы ученые обратили внимание на биоуголь (карбонизированный продукт возобновляемой биомассы), обладающий высокой адсорбционной способностью и оказывающий положительное влияние на плодородие почв. Вопрос влияния биоугля на вынос растениями из почвы питательных элементов, необходимых для их роста и развития, при избыточном содержании ТМ является малоизученным и весьма актуальным. Проведен лабораторный эксперимент по изучению способности ячменя сорта Потра усваивать азот из дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с биоуглем при избыточном содержании в ней кадмия, являющегося одним из самых токсичных для окружающей среды тяжелых металлов даже при низких концентрациях. Исследование проводилось в регулируемых условиях в вегетационных сосудах объемом 2 л и включало восемь вариантов: почва (контроль), почва + биоуголь, почва + растительные остатки (как дополнительный источник азота), совместное внесение биоугля и растительных остатков как с кадмием, так и без него в трехкратной повторности. Исследования содержания в почве и ячмене аммонийного и нитратного азота, а также кадмия были проведены по общепринятым методам.

Результаты эксперимента показали низкую устойчивость ячменя к кадмию при отсутствии биоугля и растительных остатков (контроль), в то время как их совместное внесение привело к возникновению 100%-й устойчивости растений к данному металлу. Внесение биоугля как с растительными остатками, так и без них способствовало снижению концентрации и выносу кадмия растениями ячменя, а при внесении растительных остатков без биоугля его концентрация не изменялась, однако резко увеличивался вынос кадмия за счёт роста биомассы растений. В целом совместное использование биоугля и растительных остатков позволило полностью нейтрализовать токсичное воздействие высокой дозы кадмия на минерализационные процессы, усвоение азота растениями и формирование их биомассы. Это дает возможность рекомендовать его в качестве агроприема выращивания ячменя на почве с избыточным содержанием кадмия.

Ключевые слова: биоуголь, кадмий, биомасса ячменя, устойчивость растений, азотное питание.

INFLUENCE OF BIOCHAR AND PLANT RESIDUES ON ASSIMILATION OF NITROGEN BY BARLEY FROM SOD-PODZOLIC SOIL UNDER AN EXCESSIVE AMOUNT OF CADMIUM

E. Y. Rizhiya[1], Y. R. Iskandirova[2], T. A. Bankina[2]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education
«Russian State Hydrometeorological University»,
79, Voronezhskaya ulitsa, St. Petersburg, 192007
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education
«Saint-Petersburg State University»
16th line of V.I., 29, St. Petersburg, 199034
E-mail: alenarizh@yahoo.com

To reduce the high concentrations of heavy metals in agricultural soils, various available methods have been developed, including introduction of various zeolites, minerals, synthetic substances, and composts into the soil. In the recent years more attention was paid to biochar, which is capable to reduce the negative impact of various toxicants on the environment due to its high specific surface area. The ability of barley to assimilate nitrogen from the sod-podzolic loamy sand soil with the application of wood biochar and plant residues under stress conditions due to excessive amount of cadmium (10 times higher than the maximum allowed concentration for soils) was studied in a laboratory experiment. The study was carried out under controlled conditions in vessels with a volume of 2 liter. The experiment included 8 treatments: soil control,

soil + biochar, soil + plant residues, and the combined application of biochar with plant residues, both with and without cadmium. Biochar and plant residues, which consisted of clover and timothy in equal proportions, were introduced into the vessels at the rate of 3 g kg^{-1} of dry soil. Cadmium was added to the soil at a dose of 50 mg kg^{-1}. Measurements of ammonium, nitrate-nitrogen, and cadmium content in the soil and barley were carried out by conventional methods.

The experimental results showed a low resistance of barley to cadmium in the control treatment, while the combined application of biochar with plant residues contributed to the 100% resistance of plants to the metal. The introduction of biochar, both with or without plant residues, reduced the concentration and removal of cadmium by barley plants, but plant residues without biochar did not change the concentration of cadmium and sharply increased the removal of cadmium with the plant biomass. In general, the use of biochar in combination with legume-cereal residues, resulted in complete illimination of cadmium toxic effect on mineralization processes, nitrogen assimilation, plants, the biomass formation.

Keywords: biochar, cadmium, barley biomass, plant resistance, nitrogen, nutrition.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение тяжелыми металлами является одним из основных факторов, оказывающих негативное воздействие на безопасность сельскохозяйственных продуктов. Кадмий (Cd (II)) признан одним из самых токсичных для окружающей среды тяжелых металлов, поскольку он обладает высокой мобильностью и токсичностью даже при низких концентрациях. При загрязнении почв кадмием ухудшаются их экологические функции, подавляется жизнедеятельность почвенных микроорганизмов (Tang et al., 2019; Yu et al., 2016), снижаются урожайность и качество сельскохозяйственной продукции (Chen et al., 2018). Большое количество исследований показало, что чрезмерное накопление кадмия в растениях может привести к ряду негативных физиологических реакций, таких как пожелтение, увядание, метаболические нарушения, а также снижение активности фотосинтетической системы и скорости фотосинтеза (Chen et al., 2018; Hu et al., 2017; Mwamba et al., 2016). При этом концентрация кадмия возрастает в каждом последующем звене пищевой цепи, что делает его особенно опасным для высших организмов (Hu et al., 2016).

Для снижения токсичного эффекта Cd применяются различные технологии, основанные на внесении в почву цеолитов, каменного фосфата, полимерных материалов и микробных препаратов, органических компостов и фитомелиорантов (Jorfi et al., 2019). В последние десятилетия активно изучается биоуголь как продукт, характеризующийся высоким содержанием углерода в циклической форме, высокопористой структурой, обилием функциональных групп и высокой адсорбционной способностью. В результате ряда исследований установлено, что биоуголь способствует увеличению содержания хлорофилла в растениях (до 58,5%), транспирации (на 59,7%) и устьичной проводимости (на 85%), а также обладает антиоксидантной активностью, повышает устойчивость растений к окислительному стрессу (и, таким образом, защищает их от тяжелых металлов) и препятствует абсорбции тяжелых металлов растениями (Zoghi et al., 2019; Kamran et al., 2019). Биоуголь способен выводить тяжёлые металлы из биологического круговорота за счёт присущих ему сорбционных свойств (Liu et al., 2020; Poucke et al., 2019). Однако сорбционные свойства биоугля в отношении кадмия на настоящий момент изучены недостаточно (Wu et al., 2020).

Как известно, действие любого токсичного фактора на растение проявляется прежде всего в нарушении азотного питания и, соответственно, снижении продуктивности культур. Одним из способов улучшения азотного питания растений является внесение в почву растительных остатков бобовых и злаковых культур (Рижия и др., 2019). Их минерализация приводит к увеличению содержания в почве аммония и нитрата, что способствует улучшению азотного питания растений. Кроме того, в результате их внесения резко возрастает биомасса микроорганизмов, способных осмотрофно поглощать кадмий и выводить его из зоны корневых систем.

В связи с этим целью исследования являлось изучение влияния биоугля и растительных остатков на доступность азота растениям ячменя при избытке кадмия в почве.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлся пахотный горизонт агродерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, отобранной в Гатчинском районе Ленинградской области на территории Меньковского филиала Агрофизического НИИ. Исходная почва характеризовалась высоким содержанием общего органического углерода (2,65%), невысоким содержанием общего азота (0,23%), нейтральной реакцией среды ($pH_{сол}$ – 6,0), очень высоким содержанием подвижных соединений фосфора (334 мг P_2O_5 $кг^{-1}$ почвы) и обменного калия (251 мг K_2O $кг^{-1}$ почвы), а также низким уровнем содержания минеральных форм соединений азота (2,8 мг $N\text{-}NH_4^+$ $кг^{-1}$ почвы и 5,8 мг $N\text{-}NO_3^-$ $кг^{-1}$ почвы).

Используемый в эксперименте биоуголь представлял собой карбонизированную при помощи бескислородного пиролиза при 500°С массу карельской березы и характеризовался следующими показателями: щелочная реакция среды (7,9), содержание общего углерода – 88,3%, общего азота – 0,5%, аммонийного азота – 0,4 мг $кг^{-1}$, нитратный азот не обнаружен. Также он отличался низким содержанием фосфора (7,8 мг $кг^{-1}$) и калия (79,6 мг $кг^{-1}$), поскольку почвы Карельского перешейка обеднены данными элементами.

В качестве растительных остатков использовалась в равных отношениях сухая биомасса клевера красного (*Trifolium pratense*) и тимофеевки

(Phleum pratense), в совокупности содержавшая 40,1% общего углерода и 1,8% общего азота, а также до 2% K_2O; 1,5% CaO и 0,65% P_2O_5.

В вегетационные сосуды (высота – 150 мм, диаметр – 175 мм, площадь – 240 см^2) помещалось по 2 кг воздушно-сухой почвы. В каждый сосуд добавлялось по 450 мл дистиллированной воды для достижения влажности, равной 23%, которая соответствует её наименьшей влагоёмкости. Биоуголь и бобово-злаковые растительные остатки, представленные клевером красным (Trifolium pratense) и тимофеевкой луговой (Phleum pratense), вносились в сосуды из расчета 3 г кг$^{-1}$ сухой почвы. Кадмий вносился в почву в виде $CdCl_2$ в дозе 50 мг кг$^{-1}$, что в 6 раз выше ПДК.

Лабораторный опыт включал 8 вариантов: контроль – чистая почва (П), почва + биоуголь (П+БУ), почва + растительные остатки (П+РО), совместное внесение биоугля и растительных остатков (П+БУ+РО) как с кадмием, так и без него. Компостирование проводилось в оптимальных гидротермических условиях при температуре +23°С, повторность – трёхкратная.

Через три недели компостирования в сосуды было высажено по 10 наклюнувшихся семян ячменя финского сорта Потра. Их выращивание проводилось под световыми модулями – источниками оптического излучения на основе натриевых ламп ДНаТ 400 с твердотелым теплопоглощающим светофильтром. После всходов в каждом сосуде было оставлено по шесть растений. В фазу «начало колошения» растения были убраны и высушены. В дальнейшем проводились исследования сухой биомассы растений, в ходе которых были определены вес сухой биомассы, а также общее содержание азота и кадмия в растениях.

Также были определены содержание в почве аммония и нитрата до и после компостирования и на основе полученных данных – нитрифицирующая способность почвы. Определение содержания аммония и нитратного азота в почве и азота в растениях проводилось согласно общепринятыми методами (Крейер и др., 2005), общего содержания кадмия в растениях – на атомно-абсорбционном спектрометре. Математическая обработка результатов производилась в программе IBM SPSS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В литературных источниках отмечается, что кадмиевый стресс вызывает значительное ингибирование активности ферментов, отвечающих за ассимиляцию аммония и нитрата в почве и растениях (Wahid et al., 2007; Wang et al., 2008). В табл. 1 представлены данные о влиянии биоугля и растительных остатков на % ингибирования кадмием накопления аммонийной и нитратной форм азота в почве.

Таблица 1. **Влияние биоугля и растительных остатков на ингибирование кадмием накопления $N\text{-}NH_4^+$ и $N\text{-}NO_3^-$ в почве**

Вариант	$N\text{-}NH_4^+$			$N\text{-}NO_3^-$		
	без кадмия, мг кг$^{-1}$	с кадмием, мг кг$^{-1}$	% ингибирования	без кадмия, мг кг$^{-1}$	с кадмием, мг кг$^{-1}$	% ингибирования
П	7.5 b	1.8 a	74	61.1 e	42.8 c	30
П+БУ	6.7 ab	4.6 ab	35	49.1 d	37.4 b	23
П+РО	8.9 b	6.5 ab	18	22.6 a	21.6 a	4
П+БУ+РО	6.5 ab	9.5 b	не обнаружен	48.8 d	41.0 bc	16

Здесь и далее: П – почва – контроль; БУ – биоуголь; РО – растительные остатки; средние значения с разными буквенными обозначениями (a, b, c и d) существенно различаются при $p<0,05$ (критерий Тьюки).

Максимальный % ингибирования кадмием аммония (74%) установлен в контрольном варианте (без применения биоугля и растительных остатков). Внесение биоугля привело к снижению токсичности кадмия в два раза по сравнению с фоном, а растительных остатков – в четыре раза. При совместном внесении биоугля и растительных остатков токсичное действие кадмия полностью нивелировалось. Скорее всего, биоуголь сорбировал кадмий, а растительные остатки являлись энергетическим субстратом для почвенной микробиоты, увеличивающей накопление аммония в почве и осмотрофное поглощение кадмия (Банкина и др., 2002).

Наибольшая токсичность кадмия при накоплении нитратного азота (30%) также установлена в контрольном варианте. Применение биоугля привело к снижению токсичности на 7%, а растительных остатков – в семь раз по сравнению с контролем. Совместное применение биоугля и растительных остатков способствовало снижению токсичного действия кадмия в два раза по сравнению с контролем. В данном случае именно растительные остатки оказали наибольшее влияние на уменьшение ингибирования кадмием накопления нитратного азота в почве. Известно, что нитрификация осуществляется узкоспециализированными нитрозными и нитратными бактериями, которые являются облигатными аэробами-окислителями, оптимумом для них является pH 6–8. При внесении биоугля или совместном внесении биоугля и растительных остатков жизнедеятельность нитрифицирующих микроорганизмов несколько подавлялась, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований по изучению влияния биоугля на содержание лабильного углерода и минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве (Банкина и др., 2002).

Для того чтобы в полной мере охарактеризовать азотное питание в виде нитрата, была определена нитрифицирующая способность почвы по разнице

между содержанием нитрата в почве до и после компостирования.

В табл. 2 указаны % ингибирования кадмием нитрифицирующей способности почвы при внесении биоугля и растительных остатков.

Максимальное количество кадмия отмечено в контрольном варианте, ингибирование нитрифицирующей способности здесь составило 31%. При внесении биоугля влияние кадмия на нитрифицирующую способность снизилось практически в два раза по сравнению с контролем, а при внесении растительных остатков и совместном внесении биоугля и растительных остатков ингибирующее действие кадмия на нитрифицирующую способность было нейтрализовано.

На рис. 1 отображено влияние биоугля и растительных остатков на сухую биомассу растений ячменя (в г сосуд$^{-1}$) при избыточном содержании кадмия и без него.

Таблица 2. **Влияние биоугля и растительных остатков на % ингибирования кадмием нитрифицирующей способности почвы**

Вариант	Без кадмия, мг кг$^{-1}$	С кадмием, мг кг$^{-1}$	% ингибирования
П	41.2 e	28.2 d	31 b
П+БУ	29.3 d	23,3 c	19 a
П+РО	2.2 a	7.6 b	не обнаружен
П+БУ+РО	28.6 d	28.2 d	не обнаружен

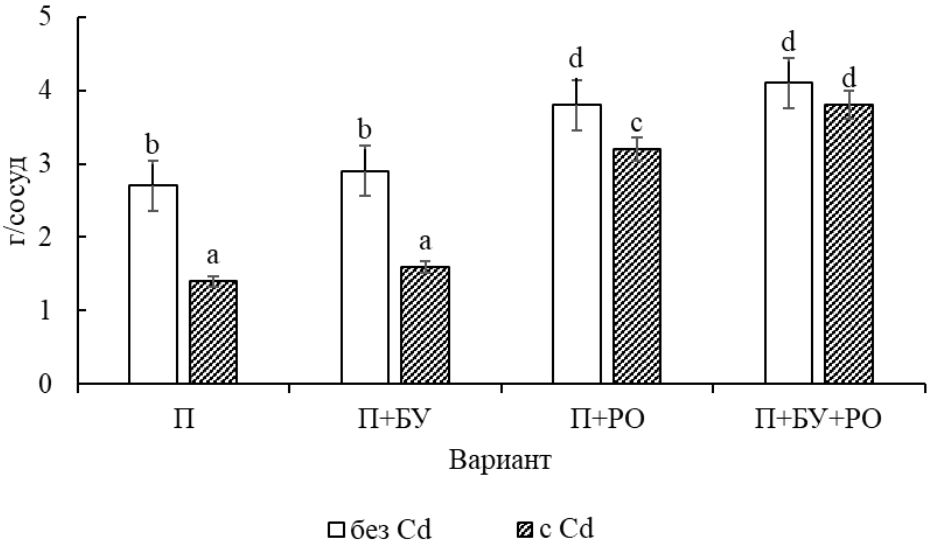

Рис. 1. Влияние биоугля и растительных остатков на сухую биомассу растений ячменя

Как видно из представленного рисунка, в вариантах без кадмия именно внесение растительных остатков как дополнительного источника питательных элементов способствовало увеличению сухой биомассы ячменя в 1,5 раза по сравнению с контролем, а биоуголь не оказывал существенного влияния на биомассу растений, однако отмечена тенденция к ее увеличению при его применении. В вариантах с кадмием величина сухой биомассы резко снизилась по сравнению с аналогичными вариантами без кадмия, в том числе при использовании биоугля и растительных остатков. Таким образом, биоуголь не смог нейтрализовать отрицательное воздействие кадмия на прирост биомассы ячменя. Внесение растительных остатков способствовало увеличению биомассы растений по сравнению с контролем, однако не смогло полностью нивелировать токсичное действие кадмия. Совместное применение биоугля и растительных остатков полностью нейтрализовало токсичное воздействие кадмия на биомассу растений ячменя, которая в вариантах как с кадмием, так и без него была достоверно ($p<0,05$) выше по сравнению с другими вариантами.

В табл. 3 представлены данные о влиянии биоугля и растительных остатков на индекс устойчивости растений к кадмию, который рассчитывался по соотношению массы растений в вариантах с кадмием и без него (выражен в процентах). Самая низкая устойчивость выращиваемых растений к кадмию установлена в контрольном варианте. При внесении биоугля индекс устойчивости повысился на 10%. Внесение растительных остатков привело к увеличению данного показателя до 90%. При совместном внесении биоугля и растительных остатков установлена 100%-я устойчивость растений к кадмию, поскольку в данном варианте биоуголь сорбировал кадмий и выводил его из зоны корневой системы, а растительные остатки, стимулируя жизнедеятельность микроорганизмов почвы, обеспечивали улучшение азотного питания.

На рис. 2 отображено влияние биоугля и растительных остатков на вынос азота растениями ячменя из почвы с кадмием и без него.

Таблица 3. **Влияние биоугля и растительных остатков на индекс устойчивости растений к кадмию, %**

Вариант	Масса растений без Cd, г сосуд$^{-1}$	Масса растений с Cd, г сосуд$^{-1}$	Индекс устойчивости, %
П	2.7 b	1.3 a	48
П+БУ	2.8 b	1.6 a	58
П+РО	3.8 d	3.5 c	90
П+БУ+РО	4.0 d	4.0 d	100

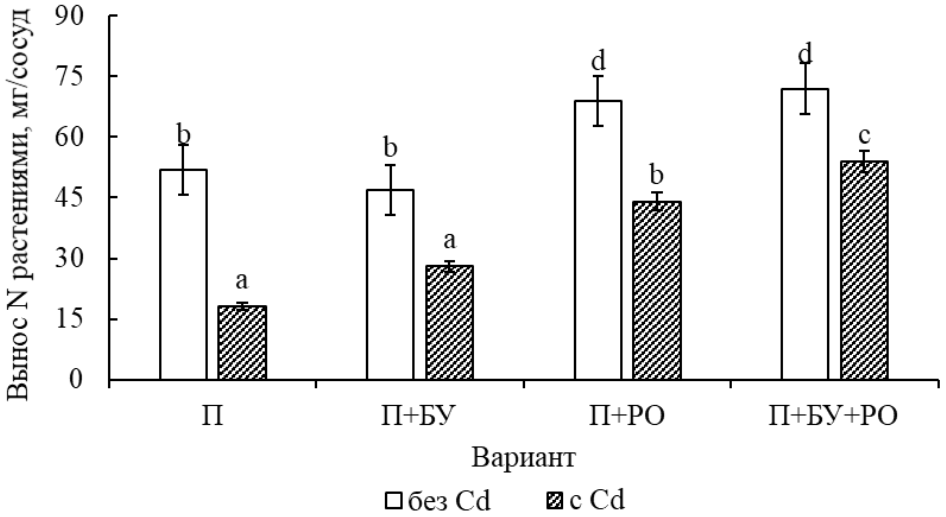

Рис. 2. Влияние биоугля и растительных остатков на вынос азота растениями ячменя, мг сосуд$^{-1}$

Как видно из рисунка, при содержании в почве кадмия азот усваивался растениями в достоверно ($p<0,05$) меньших количествах, чем без него. Биоуголь не оказал никакого влияния на усвоение азота растениями в вариантах без кадмия, а при содержании в почве кадмия внесение биоугля привело к достоверному увеличению содержания и выносу азота растениями ячменя, однако полной нейтрализации токсичного действия кадмия достичь не удалось. Внесение растительных остатков и совместное применение растительных остатков с биоуглем способствовали повышению интенсивности усвоения азота растениями до уровня контрольного варианта без кадмия, но не смогли полностью нивелировать ингибирующее действие кадмия.

В табл. 4 отображено влияние биоугля и растительных остатков на концентрацию и усвоение кадмия растениями ячменя.

Концентрация кадмия в растениях ячменя была максимальной в контрольном варианте и в вариантах с внесением в почву только растительных остатков без существенных статистических различий. Наименьшая концентрация кадмия в растениях отмечена в вариантах с биоуглем. Это можно объяснить сорбцией кадмия биоуглем.

В табл. 5 отображено поступление кадмия из почвы в растения ячменя при внесении биоугля и растительных остатков.

Таблица 4. **Влияние биоугля и растительных остатков на концентрацию и усвоение кадмия растениями ячменя**

Вариант	Сухой вес растений, г сосуд$^{-1}$	Концентрация Cd в растениях, мг г$^{-1}$ сухой биомассы	Усвоение Cd растениями, мг сосуд$^{-1}$
П	2.7 b	0.000	0.000
П+Cd	1.3 a	0.060 b	0.079 b
П+БУ+Cd	1.6 a	0.027 a	0.043 a
П+РО+Cd	3.5 c	0.052 b	0.181 d
П+БУ+РО+Cd	4.0 d	0.027 a	0.109 c

Таблица 5. **Влияние биоугля и растительных остатков на поступление кадмия из почвы в растения ячменя, %**

Вариант	Содержание Cd в почве, мг сосуд$^{-1}$	Поступление Cd в растения ячменя, мг сосуд$^{-1}$	% поступления Cd в растения из почвы
П+Cd	25.0	0.079 b	0.32
П+БУ+Cd	25.0	0.043 a	0.17
П+РО+Cd	25.0	0.181 d	0.72
П+БУ+РО+Cd	25.0	0.109 c	0.44

Наименьший процент поступления кадмия из почвы в растения установлен в варианте с биоуглем, наибольший – в вариантах с использованием растительных остатков, причем в варианте с совместным внесением биоугля и растительных остатков отмечено несколько меньшее поступление кадмия в растения, что может быть связано с частичной сорбцией кадмия биоуглем.

Таким образом, биоуголь рекомендуется использовать с целью снижения поступления кадмия в растения, а растительные остатки, напротив, с целью увеличения выноса кадмия растительной биомассой для повышения эффективности процесса фиторемедиации загрязнённых кадмием почв.

ВЫВОДЫ

1. Биоуголь и бобово-злаковые растительные остатки способствовали увеличению содержания аммония и нитрата в почве в условиях стресса, вызванного избыточным количеством кадмия.

2. По сравнению с биоуглем бобово-злаковые растительные остатки способствовали снижению токсичности кадмия в два раза при накоплении аммония в почве и в пять раз при накоплении нитрата.

3. Биоуголь не оказал влияния на величину сухой биомассы ячменя как при содержании Cd в почве, так и без него. Совместное применение биоугля и растительных остатков нивелировало отрицательное воздействие Cd на биомассу растений ячменя.

4. Самая низкая устойчивость к кадмию отмечена в почве без добавления биопрепаратов. Совместное внесение биоугля и растительных остатков способствовало возникновению 100%-й устойчивости растений к кадмию, поскольку в данном варианте биоуголь сорбировал кадмий и выводил его из зоны корневой системы, а растительные остатки, стимулируя жизнедеятельность микроорганизмов почвы, обеспечивали улучшение азотного питания.

5. Внесение биоугля в почву, загрязненную кадмием, привело к достоверному, но минимальному увеличению выноса азота растениями ячменя, а применение растительных остатков способствовало увеличению поступления азота в растения до уровня контрольного варианта без Cd.

6. В результате внесения биоугля снизились концентрация и усвоение кадмия растениями ячменя, при применении растительных остатков концентрация кадмия не изменилась, однако резко увеличился вынос кадмия за счёт роста биомассы растений.

Список литературы

Банкина Т.А., Петров М.Ю., Петрова Т.М., Банкин М.П. Хроматография в агроэкологии. СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. 580 с.

Крейер К.Г., Банкина Т.А., Орлова Н.Е., Юрьева Г.М. Практикум по агрохимическому анализу почв. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2005. С. 53–66.

Рижия Е.Я., Хомяков Ю.В., Мухина И.М., Москвин М.А., Гурова Т.А. Почвенно-биологические процессы в дерново-подзолистой супесчаной почве с биоуглем // Агрофизика. 2019. № 3. С. 26–32.

Chen Q., Lu X., Guo X., Pan Y., Yu B., Tang Z., Guo Q. Differential responses to Cd stress induced by exogenous application of Cu, Zn or Ca in the medicinal plant Catharanthus roseus // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. Vol. 157. pp. 266–275.

Gallego S.M., Pena L.B., Barcia R.A., Azpilicueta C.E., Iannone M.F., Rosales E.P., Zawoznik M.S., Groppa M.D., Benavides M.P. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms // Environ. Exp. Bot. 2012. Vol. 83. pp. 33–46.

Huang Y., Hu Y., Liu Y. Heavy metal accumulation in iron plaque and growth of rice plants upon exposure to single and combined contamination by copper, cadmium and lead // Acta Ecol. Sin. 2009. Vol. 29 (6). pp. 320–326.

Hu L., Wan J., Zeng G., Chen A., Chen G., Huang Z., He K. Comprehensive evaluation of the cytotoxicity of CdSe/ZS quantum dots in *Phanerochaete chrysosporium* by cellular uptake and oxidative stress // Environ. Sci. 2017. Vol. 4. pp. 10.

Hu L., Zhang C., Zeng G., Chen G., Wan J., Guo Z., Wu H., Yu Z., Zhou Y. Metal-based quantum dots: synthesis, surface modification, transport and fate in aquatic environments and toxicity to microorganisms // Rsc. Adv. 2016. Vol. 6. pp. 78595–78610.

Jorfi S., Shooshtarian M.R., Pourfadakari S. Decontamination of cadmium from aqueous solutions using zeolite decorated by Fe_3O_4 nanoparticles: adsorption modeling and thermodynamic studies // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2020. Vol. 17(1). pp. 273–286.

Khanam R., Kumar A., Nayak A.K., Shahid M., Tripathi R., Vijayakumar S., Bhaduri D., Kumar U., Mohanty S., Panneerselvam P., Chatterjee D., Satapathy B.S., Pathak H. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health // Science of the Total Environment. 2020. 10;699:134330. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134330

Kamran M., Malik Z., Parveen A., Li H. et al. Ameliorative effects of biochar on rapeseed (*brassica napus* L.) growth and heavy metal immobilization in soil irrigated with untreated wastewater // J. Plant Growth Regul. 2020. Vol. 39. pp. 266–281.

Liu L., Deng G., Shi X. Adsorption characteristics and mechanism of p-nitrophenol by pine sawdust biochar samples produced at different pyrolysis temperatures // Scientific Reports. 2020. № 10(1). doi: 10.1038/ s41598-020-62059-y

Mwamba T.M., Ali S., Ali B., Lwalaba J.L., Liu H., Farooq M.A., Shou J., Zhou W. Interactive effects of cadmium and copper on metal accumulation, oxidative stress, and mineral composition in Brassica napus // Int. J. Environ. Sci.Technol. 2016. Vol. 13. pp. 2163–2174.

Poucke R. van, Meers E., Tack F.M.G. Leaching behavior of Cd, Zn and nutrients (K, P, S) from a contaminated soil as affected by amendment with biochar // Chemosphere. 2019. 125561.

Tang J., Zhang J., Ren L., Zhou Y., Gao J., Luo L., Yang Y., Peng Q., Huang H., Chen A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution // Journal of Environmental Management. 2019. № 242. pp. 121–130.

Yu H., Xiang Y., Zo D. The effect of Eulaliopsis binata on the physi-chemical properties, microbial biomass, and enzymatic activities in Cd-Pb polluted soil // Environ. Sci. Pollut. Res. 2016. № 23. pp. 19212–19218.

Wahid A., Ghani A., Ali I., Ashraf M.Y. Effects of cadmium on carbon and nitrogen assimilation in shoots of mungbean *Vigna radiata* (L.) Wilczek seedlings // J. Agron. Crop Sci. 2007. Vol. 193. pp. 357–365.

Wang L., Zhou Q.X., Ding L.L., Sun Y.B. Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 154. pp. 818–825.

Wu H., Qin X., Wu H., Li F., Wu J., Zheng L., Wang J., Chen J., Zhao Y., Lin S., Lin W. Biochar mediates microbial communities and their metabolic characteristics under continuous monoculture // Chemosphere. 2020. № 246. e 125835. doi: 10.1016/ j. chemosphere.2020.125835

Zoghi Z., Hosseini S.M., Kouchaksaraei M.T. The effect of biochar amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress // Eur. J. For. Res. 2019. Vol. 138. pp. 967–979.

References

Bankina T.A., Petrov M.Yu., Petrova T.M., Bankin M.P. *Khromatografiya v agroekologii* [Chromatography in agroecology]. Saint-Petersburg: Research Institute of Chemistry of SpbSU Publishing house, 2002, 580 p.

Kreyyer K.G., Bankina T.A., Orlova N.E., Yur'yeva G.M. *Praktikum po agrokhimicheskomu analizu pochv* [Practicum on agrochemical soil analysis]. Saint-Petersburg: St. Petersburg University Publishing House, 2005, pp. 53–66.

Rizhiya E.Ya., Khomyakov Yu.V., Mukhina I.M., Moskvin M.A., Gurova T.A. Pochvenno-biologicheskiye protsessy v dernovo-podzolistoy supeschanoy pochve s biouglem [Soil biological processes in sod-podzolic sandy loam soil with biochar] // *Agrofizika*, 2019, no. 3, pp. 26–32.

Chen Q., Lu X., Guo X., Pan Y., Yu B., Tang Z., Guo Q. Differential responses to Cd stress induced by exogenous application of Cu, Zn or Ca in the medicinal plant Catharanthus roseus // Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, vol. 157, pp. 266–275.

Gallego S.M., Pena L.B., Barcia R.A., Azpilicueta C.E., Iannone M.F., Rosales E.P., Zawoznik M.S., Groppa M.D., Benavides M.P. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms // Environ. Exp. Bot., 2012, vol. 83, pp. 33–46.

Huang Y., Hu Y., Liu Y. Heavy metal accumulation in iron plaque and growth of rice plants upon exposure to single and combined contamination by copper, cadmium and lead // Acta Ecol. Sin., 2009, vol. 29 (6), pp. 320–326.

Hu L., Wan J., Zeng G., Chen A., Chen G., Huang Z., He K. Comprehensive evaluation of the cytotoxicity of CdSe/ZS quantum dots in *Phanerochaete chrysosporium* by cellular uptake and oxidative stress // Environ. Sci., 2017, vol. 4. pp. 10.

Hu L., Zhang C., Zeng G., Chen G., Wan J., Guo Z., Wu H., Yu Z., Zhou Y. Metal-based quantum dots: synthesis, surface modification, transport and fate in aquatic environments and toxicity to microorganisms // Rsc. Adv., 2016, vol. 6, pp. 78595–78610.

Jorfi S., Shooshtarian M.R., Pourfadakari S. Decontamination of cadmium from aqueous solutions using zeolite decorated by Fe_3O_4 nanoparticles: adsorption modeling and thermodynamic studies // Int. J. Environ. Sci. Technol., 2020, vol. 17(1), pp. 273–286.

Khanam R., Kumar A., Nayak A.K., Shahid M., Tripathi R., Vijayakumar S., Bhaduri D., Kumar U., Mohanty S., Panneerselvam P., Chatterjee D., Satapathy B.S., Pathak H. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health // Science of the Total Environment, 2020, vol. 10, pp. 699. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134330

Kamran M., Malik Z., Parveen A., Li H. et al. Ameliorative effects of biochar on rapeseed (*Brassica Napus* L.) growth and heavy metal immobilization in soil irrigated with untreated wastewater // J. Plant Growth Regul., 2020, vol. 39, pp. 266–281.

Liu L., Deng G., Shi X. Adsorption characteristics and mechanism of p-nitrophenol by pine sawdust biochar samples produced at different pyrolysis temperatures // Scientific Reports, 2020, no. 10(1). DOI: 10.1038/ s41598-020-62059-y

Mwamba T.M., Ali S., Ali B., Lwalaba J.L., Liu H., Farooq M.A., Shou J., Zhou W. Interactive effects of cadmium and copper on metal accumulation, oxidative stress, and mineral composition in Brassica napus // Int. J. Environ. Sci. Technol., 2016, vol. 13, pp. 2163–2174.

Poucke R. van, Meers E., Tack F.M.G. Leaching behavior of Cd, Zn and nutrients (K, P, S) from a contaminated soil as affected by amendment with biochar // Chemosphere, 2019, 125561.

Tang J., Zhang J., Ren L., Zhou Y., Gao J., Luo L., Yang Y., Peng Q., Huang H., Chen A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution // Journal of Environmental Management, 2019, no. 242, pp. 121–130.

Yu H., Xiang Y., Zo D. The effect of Eulaliopsis binata on the physi-chemical properties, microbial biomass, and enzymatic activities in Cd-Pb polluted soil // Environ. Sci. Pollut. Res., 2016, no. 23, pp. 19212–19218.

Wahid A., Ghani A., Ali I., Ashraf M.Y. Effects of cadmium on carbon and nitrogen assimilation in shoots of mungbean *Vigna radiata* (L.) Wilczek seedlings // J. Agron. Crop Sci., 2007, vol. 193, pp. 357–365.

Wang L., Zhou Q.X., Ding L.L., Sun Y.B. Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator // Journal of Hazardous Materials, 2008, vol. 154, pp. 818–825.

Wu H., Qin X., Wu H., Li F., Wu J., Zheng L., Wang J., Chen J., Zhao Y., Lin S., Lin W. Biochar mediates microbial communities and their metabolic characteristics under continuous monoculture // Chemosphere, 2020, no. 246, e125835. DOI: 10.1016/j. chemosphere.2020.125835

Zoghi Z., Hosseini S.M., Kouchaksaraei M.T. The effect of biochar amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress // Eur. J. For. Res., 2019, vol. 138, pp. 967–979.

УДК 631.421(1-924.85) (470.57) DOI:10.25695/AGRPH.2021.03.05

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН (НА ПРИМЕРЕ ИГЛИНСКОГО РАЙОНА)

А. А. Киселева, Н. Г. Курмашева, И. Г. Асылбаев, А. Н. Хасанов, З. М. Низаметдинов

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

450001, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул.50-летия Октября, 34

E-mail: kiseleva.anna93@yandex.ru

Поступила в редакцию 23 августа 2021 г., принята к печати 30 августа 2021 г.

Изучены свойства серых лесных почв сельскохозяйственного назначения, расположенных в Иглинском районе Северной лесостепной зоны Республики Башкортостан. Серые лесные почвы занимают 73% территории и представлены 80 разновидностями. Проанализированы морфологические и агрохимические свойства почв, ретроспективный анализ проведен по результатам обследований 1984 и 2017 гг. По результатам обследований установлено, что в темно-серой лесной почве активно проявляется процесс дегумификации — за 33-летний период содержание общего гумуса снизилось на 1,6%. В серых лесных и светло-серых лесных почвах процесс дегумификации развит не так сильно. В первом туре обследований реакция почвенной среды варьировалась от слабокислой до близкой к нейтральной, во втором туре все почвы характеризовались кислой реакцией среды. Уровень содержания питательных элементов в светло-серой и серой лесной почвах повысился. В темно-серой лесной почве произошло снижение содержания подвижного фосфора на 11,3 мг на кг почвы, обменного калия — на 23,2 мг на кг почвы. Таким образом, длительная интенсивная антропогенная нагрузка оказала существенное влияние на плодородие темно-серых лесных почв.

Ключевые слова: почвенное плодородие, Северная лесостепь, мониторинг, агрохимические показатели, ретроспективный анализ, подвижный фосфор, обменный калий, гумус.