

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«АГРОФИЗИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»



МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОГО
НАУЧНОГО СЕМИНАРА
**«БИОУГОЛЬ: СВОЙСТВА,
ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ,
ВЛИЯНИЕ НА ПОЧВЫ, РАСТЕНИЯ И
ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ»**
ФГБНУ АФИ, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ
08 ДЕКАБРЯ 2020 Г.



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«АГРОФИЗИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»



МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОГО
НАУЧНОГО СЕМИНАРА
**«БИОУГОЛЬ: СВОЙСТВА,
ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ, ВЛИЯНИЕ НА
ПОЧВЫ, РАСТЕНИЯ И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ»**

ФГБНУ АФИ, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ
08 ДЕКАБРЯ 2020 Г.

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC SEMINAR
**"BIOCHAR: PROPERTIES,
APPLICATION IN AGRICULTURE, EFFECT ON SOILS, CROPS
AND ENVIRONMENT"**

AGROPHYSICAL RESEARCH INSTITUTE, ST. PETERSBURG, RUSSIA
DECEMBER 08, 2020

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Материалы международного научного семинара «**Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду**». ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2020. – 123 с.

В сборнике представлены результаты научных исследований, направленных на изучение применения биоугля в сельском хозяйстве. В статьях освещаются вопросы воздействия биоугля на физические, химические, агрохимические и биологические свойства почв, его влияния на рост и развитие растений, эмиссию парниковых газов, поведение загрязняющих веществ в почве. Кроме того, представлены работы, посвященные свойствам различных биоуглей в зависимости от условий их производства и времени нахождения в почве.

Материалы даны в авторской редакции

ОТВЕТСТВЕННЫЕ ЗА ВЫПУСК:

БУЧКИНА Н. П.

ГУРОВА Т. А.

ВЛИЯНИЕ БИОЧАРА НА ПОДВИЖНОСТЬ Cu В СОЧЕТАННО ЗАГРЯЗНЕННОМ ЧЕРНОЗЕМЕ ОБЫКНОВЕННОМ

БАРАХОВ А.В.¹, ЛОБЗЕНКО И.П.¹, ДУДНИКОВА Т.С.¹, МИНКИНА Т.М.¹, БРЕНЬ Д.В.¹

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Ростовская область
tolik.barakhov@mail.ru

Аннотация Изучено влияние биочара на подвижность Cu в черноземе обыкновенном при сочетанном загрязнении металлом и бенз(а)пиреном. Установлено увеличение количества непрочно связанных соединений (обменных, комплексных и специфически сорбированных) в загрязненной почве. Внесение сорбента в почву привело к уменьшению содержания наиболее мобильных соединений Cu .

Ключевые слова. Углеродистый сорбент. Тяжелые металлы. Почва. Сочетанное загрязнение. Полициклические ароматические углеводороды.

Введение

Почва ключевое звено биогеохимических циклов химических элементов. В загрязненных почвах изменяются физические, химические, биологические свойства. Тяжелые металлы (ТМ) и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) одни из приоритетных загрязнителей почвы (Rajput et al., 2020). Достаточно хорошо изучено влияние органических и неорганических загрязнителей, однако сочетанное загрязнение ТМ и ПАУ изучено недостаточно комплексно (Mackay et al., 2006). Медь является приоритетным загрязняющим веществом почв Ростовской области (Минкина и др., 2008). Одно из самых опасных соединений из группы ПАУ, относящихся к ксенобиотикам, является бенз(а)пирен (БаП). БаП высокомолекулярное органическое соединение (Haritash et al., 2009) попадающее в почву из природных источников, а также из-за антропогенной деятельности (Минкина и др. 2011). Для восстановления почв, подвергшихся загрязнению, в основном применяют методы, которые способствуют снижению концентраций поллютантов до безопасного уровня (Kabata-Pendias et al., 2011). Выраженные сорбционные свойства в отношении различных поллютантов ключевая особенность мелиорантов (Ермаков и др. 2012). Биочар (биоуголь) – высокопористый материал обладающий большой площадью поверхности, что способствует повышенной сорбции имобильности органических, так и неорганических поллютантов и снижение их мобильности в загрязненных почвах (Зерщикова и др. 2011).

Цель работы – определить эффективность применения углеродистого сорбента (биочара) на снижение подвижности Cu в сочетанно загрязненном (CuO и БаП) черноземе обыкновенном.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели был заложен модельный опыт: в пластиковые емкости помещали по 50 г почвы, просеянной через сито диаметром ячеек 2 мм, добавляли водный раствор ацетата Cu и раствор БаП в ацетонитриле. Доза внесения металла 5 ПДК (275 мг кг^{-1} , (Метод. указ., 1992) и 10 ПДК БаП (200 мг л^{-1}) (Sushkova et al., 2019). Через 2 месяца после закладки опыта в загрязненную почву добавляли сорбент (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 % от массы почвы). В качестве сорбента вносили биочар. Опыт проведен в трехкратной повторности на искусственно загрязненном черноземе обыкновенном карбонатном мощном по следующей схеме: 1) Контроль; 2) 0,5% биочар; 3) 1% биочар; 4) 1,5% биочар; 5) 2% биочар 6) 2,5% биочар 7) 10 ПДК

БаП + 5 ПДК Cu - Фон 1 8) Фон 1+ 0,5% биочар 9) Фон 1+ 1% биочар 10) Фон 1+ 1,5% биочар 11) Фон 1+ 2% биочар 12) Фон 1+ 2,5% биочар. Исследуемый образец почвы обладает следующими физико-химическими свойствами: pH – 7,3; содержание физической глины – 48,1%; ила – 28,6%; органического углерода – 3,7% (Минкиной и др., 2011).

Валовое содержание Cu определено с использованием метода рентгенфлуоресцентной спектроскопии. Содержание непрочно связанных (НС) соединений Cu в почве определено на основе результатов экстракции из почвы тремя параллельными вытяжками, позволяющими извлекать обменные (1 н. аммонийно-ацетатный буфер (ААБ), pH 4,8), комплексные (разница между содержанием в вытяжках 1% раствор ЭДТА в ААБ, pH 4,8, и ААБ) и специфически сорбированные (специфически между количествами, извлекаемыми вытяжками 1н HCl и ААБ) соединения металлов из почвы.

Содержание Cu в экстрактах было определено с помощью атомно-абсорбционной спектрофотометрии (атомно-абсорбционный спектрометр с электротермической атомизацией и поляризационной Зеемановской коррекцией неселективного поглощения МГА-915МД, НПФ ГК «Люмэкс», Санкт-Петербург).

Результаты и обсуждение

Валовое содержание Cu в исследуемой почве составило 44,0 мг кг⁻¹, что соответствует санитарным нормам и литературным данным (Табл. 1) (Громакова и др. 2011). Среднее содержание Cu в черноземах обыкновенных установлено на уровне 29,0-32,6 мг кг⁻¹. Региональные оценки содержаний элемента, произведенные более 50 лет назад, составляют 15-40 мг кг⁻¹ для черноземов (Акимцев и др., 1962).

Содержание НС соединений Cu в черноземе обыкновенном не превышает 3 мг кг⁻¹ (Табл. 1). Основная доля в составе группы НС соединений представлена специфически сорбированными формами (Рис. 1), являющимися ближайшим резервом прочно удерживаемых соединений металла. Содержание обменных и комплексных соединений металла незначительное. Низкая концентрация наиболее подвижных (обменных) соединений Cu в черноземе обыкновенном карбонатном объясняется присутствием карбонатов, их высоко дисперсной мицелярной формой и слабощелочной реакцией среды (Акимцев и др., 1962). При добавлении углеродистого сорбента (биочара) в чернозем обыкновенный содержание НС соединений Cu практически не изменяется (Табл. 1, Рис. 1).

Таблица 1. Содержание Cu в черноземе обыкновенном при внесении сорбентов в условиях модельного лабораторного эксперимента, мг кг⁻¹

Вариант опыта	Общее содержание	Обменные	Комплексные	Специфически сорбированные	Сумма НС
Контроль	44,00±2,4	0,43±0,04	0,34±0,06	1,82±0,06	2,59
0,5% биочар	46,12±2,9	0,44±0,05	0,33±0,06	1,82±0,06	2,57
1% биочар	42,10±2,8	0,37±0,04	0,29±0,04	1,58±0,05	2,24
1,5% биочар	42,74±3,1	0,31±0,06	0,24±0,05	1,31±0,04	1,86
2% биочар	44,05±2,6	0,19±0,05	0,23±0,05	1,18±0,05	1,60
2,5% биочар	43,99±2,3	0,14±0,03	0,17±0,04	0,88±0,05	1,19

С увеличением дозы внесения сорбента до 2,5% наблюдалась тенденция к снижению содержания подвижных форм Си. Наибольшее уменьшение наблюдается при внесении биочара в дозах 2,5 %: сумма НС составила 1,1 мг кг⁻¹ и 1,2 мг кг⁻¹ соответственно, что ниже контроля на 4% и 3% (Таб. 1).

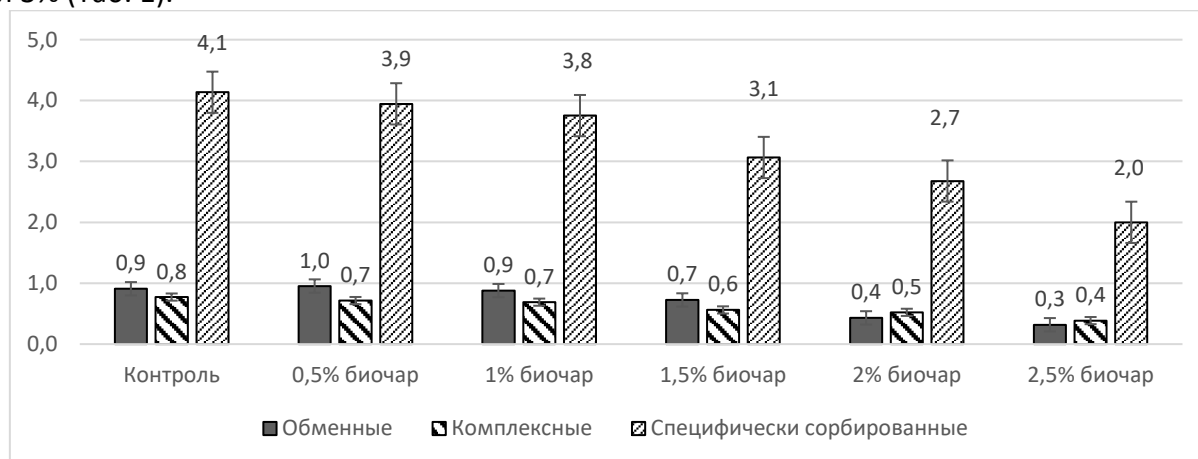


Рис. 1. Относительное содержание непрочно связанных соединений Си в черноземе обыкновенном после внесения сорбентов в условиях модельного лабораторного эксперимента, % от валового содержания

При искусственном загрязнении валовое содержание Си увеличивается в соответствии с дозой загрязнения (Табл. 2). Установлено, что содержание всех форм НС соединений Си увеличилось в несколько раз при внесении в почву органических и неорганических поллютантов (Рис. 2). С увеличением дозы загрязнения доля НС соединений от валового содержания Си увеличивается: при внесении 5 ПДК Си содержание подвижных форм составило 49 % (Таб. 2).

Таблица 2. Содержание Си в загрязненном черноземе обыкновенном при внесении сорбентов в условиях модельного лабораторного эксперимента, мг кг⁻¹

Вариант опыта	Общее содержание	Обменные	Комплексные	Специфически сорбированные	Сумма НС
10 ПДК БаП + 5 ПДК Си - Фон	321,83±11,7	51,74±2,2	45,00±1,9	61,53±2,1	158,2
Фон+ 0,5% биочар	315,15±11,4	41,39±3,2	34,54±0,6	47,94±2,1	123,87
Фон+ 1% биочар	321,72±12,6	30,46±1,8	24,82±0,7	38,54±2,2	93,82
Фон+ 1,5% биочар	312,87±12,2	21,92±1,7	16,31±2,3	27,91±2,7	66,14
Фон+ 2% биочар	311,69±11,0	13,56±2,1	15,73±2,4	20,65±2,3	49,94
Фон+ 2,5% биочар	322,99±12,7	4,80±2,8	5,89±2,0	14,11±2,7	24,80

При сочетанном загрязнении почвы происходит изменение в групповом составе непрочно связанных соединений Си: увеличилась доля обменных и комплексных соединений за счёт уменьшения доли специфически сорбированных соединений практически в 2 раза (Рис. 2).

При добавлении сорбентов к загрязнённой почве содержание подвижных форм меди снижалось на всех уровнях загрязнения (Табл. 2, Рис. 2). Доза сорбентов 0,5 % не оказывала значительного эффекта на содержание НС соединений Си, однако даже при такой низкой дозе сорбентов прослеживается тенденция к снижению содержания подвижных форм металла (Рис. 2).

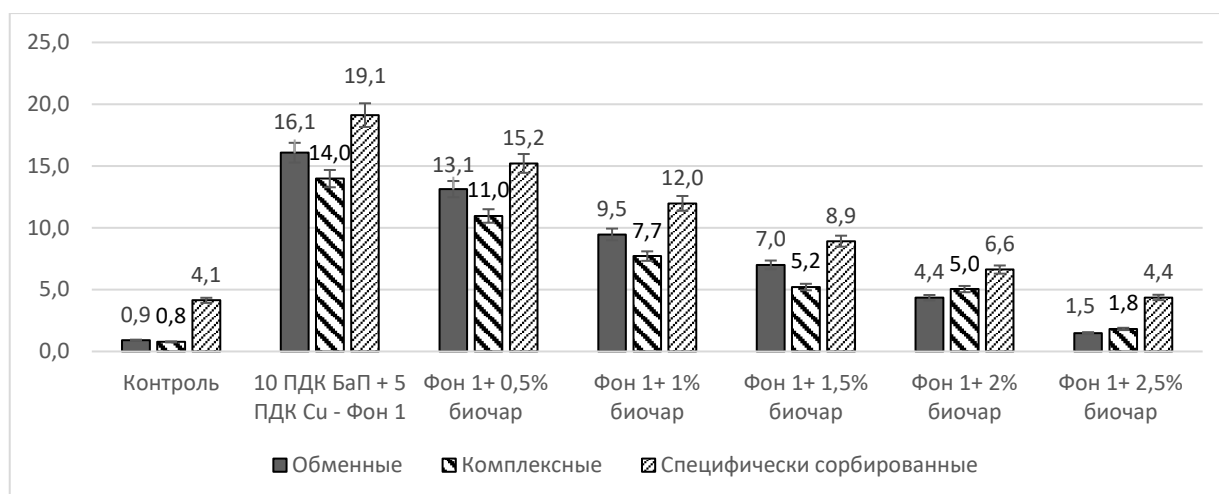


Рис. 2. Содержание непрочно связанных соединений Cu в черноземе обыкновенном модельного лабораторного эксперимента, загрязнённом 10 ПДК БАП + 5 ПДК Cu (Фон 1), при внесении сорбента, % от валового содержания

С увеличением дозы сорбентов их эффект усиливался. Наибольшее снижение содержания непрочно связанных соединений Cu наблюдается при внесении биочара в дозе 2,5 %: сумма НС соединений уменьшилась на 42 % (Рис. 2). Эффект при применении биочара объясняется следующим механизмом сорбции - усиление гидрофобности и увеличение площади реагирующей поверхности, что приводит к усиленной адсорбции (Tsui et al., 2008).

Внесение сорбента провоцирует снижение доли обменных и комплексных форм металла, увеличивая при этом долю специфически сорбированных соединений (Рис. 1, 2) При дозе загрязнения 5 ПДК Cu данный эффект проявляется достаточно ярко.

Выводы

Установлено, что внесение в почву поллютантов привело к увеличению подвижности Cu в почве модельного лабораторного эксперимента. При этом доля обменных и комплексных форм Cu увеличивалась за счёт уменьшения доли специфически сорбированных форм металла.

Внесение углеродистого сорбента в незагрязненную почву достоверно не повлияло на содержание НС соединений ТМ. Внесение биочара в сочетанно загрязненную почву способствовало инактивации Cu. При этом снижалось в первую очередь содержание наиболее подвижных - обменных форм Cu. Наилучший эффект на загрязненной почве оказал биочар в дозе 2,5%: при внесении его в почву содержание НС соединений снизилось до значений, близких к контрольным. Распределение Cu по формам соединений в незагрязненной и загрязненной почве одинаковое: специфически сорбированные > комплексные > обменные.

Благодарности

Исследования были выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-34-90185

Список литературы

Акимцев В. В., Болдырева А. В., Голубев С. Н., Кудрявцев М. И., Руденская К. В, Садименко П. А., Собдорникова И. Г. Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // Материалы Третьего межвузовского совещания «Микроэлементы и естественная радиоактивность почв». - 1962. – С. 37-42.

- Громакова Н. В., Бибик О. А. Сравнительная оценка плодородия почвенного покрова различной антропогенной нагруженности // Вестник Донского государственного аграрного университета. – 2011. - № 2(2). – С. 23-26.
- Ермаков А. А., Карпова Е. А., Шохин В. А., Парубец Ю. С. Сравнение альтернативных вариантов подготовки почвенных проб для оценки обеспеченности почв микроэлементами // Проблемы агрохимии и экологии. - 2012. - № 3. - С. 52–55.
- Зерщикова М.А. Последствия загрязнения окружающей среды и их влияние на экономические показатели (методы сохранения и улучшения состояния окружающей среды) [Электронный ресурс] // Инженерный Вестник Дона. - 2011. - № 1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/326> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
- Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. — Введ. 1992-04-10.— М., 1992. - 27 с.
- Минкина Т. М. Мотузова Г. В., Назаренко О. Г. Комбинированный прием фракционирования соединений металлов в почвах // Почвоведение. - 2008. – № 11. – С. 1324-1333.
- Минкина Т. М., Назаренко О. Г., Мотузова Г. В., Манджиева С. С., Бурачевская М. В. Групповой состав соединений тяжелых металлов в почвах агроценозов, загрязненных аэрозольными выбросами Новочеркасской ГРЭС // Агрохимия. - 2011. - № 6. - С. 68–77.
- ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09. Количественный химический анализ почв // Методика выполнения измерений массовых долей полициклических ароматических углеводородов в почвах, донных отложениях, осадках сточных вод и отходах производства и потребления методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. – М.: Стандартинформ, 2009. - 11 с.
- Haritash A. K., Kaushik C. P. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review // Journal of Hazardous Materials. - 2009. - Vol. 169. - P. 1–15.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition. – Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011. – 548 p.
- Mackay D., Shiu W. Y., Ma K.-C., Lee S. C. Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals. 2nd ed.: in 4 vol. - Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group: Introduction and Hydrocarbons, 2006. – 919 p.
- Rajput V., Minkina T., Semenov I., Klink G., Tarigholizadeh S., Sushkova S. Phylogenetic analysis of hyperaccumulator plant species for heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons // Environmental Geochemistry and Health. - 2020.
- Sushkova S., Minkina T., Deryabkina I., Rajput V., Antonenko E., Nazarenko O., Hakki E., Mohan D // Environmental pollution of soil with PAHs in energy producing plants zone // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 655. – P. 232-241.
- Tsui L., Roy W. R. The potential applications of using compost chars for removing the hydrophobic herbicide atrazine from solution // Bioresource technology. - 2008. – Vol. 99(13). – P. 5673-5678.

EFFECT OF BIOCHAR ON CU MOBILITY IN COMBINED POLLUTED HAPLIC CHERNOZEM

BARAKHOV A.V.¹, LOBZENKO I. P.¹, DUDNIKOVA T. S.¹, MINKINA T. M.¹, BREN D. V.¹

¹ Southern Federal University, Rostov-on-don, Rostov region
tolik.barakhov@mail.ru

Abstract. The study of Cu mobility in a soil with combined contamination of HM and PAH after application of biochar was carried out. An increase in the amount of loosely bound compounds (exchange, complex, and specifically sorbed) in the polluted soil was found. The biochar application led to a decrease in the content of mobile Cu compounds, as well as to a reduction of their mobility in the soil.

Keywords. Carbon sorbent. Heavy metals. Combined pollution. Polycyclic aromatic hydrocarbons. Biochar.

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА СОДЕРЖАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФОРМ АЗОТА В ПОЧВЕ И БИОМАССЕ КАПУСТЫ

БЕЛАЯ А.А.¹, ПАТРУШЕВА О.В.¹, НЕСТЕРОВА О.В.¹, БРИКМАНС А.В.¹

¹ ФГАОУ ВО ДВФУ, Владивосток, Приморский край

belaia.aa@students.dvfu.ru, patrusheva.ov@dvfu.ru, nesterova.ov@dvfu.ru, brikmans.av@dvfu.ru

Аннотация. Изучены агропочвы и поздняя капуста с экспериментальных полей Приморской овощной опытной станции (п. Суражевка) с дренажной и бездренажной системами. Определено содержание в почвах аммонийной и нитратной форм азота, содержание углерода и pH. Показатели аммонийного и нитратного азота в агропочве при внесении биоугля в конце вегетационного периода возрастают. В биомассе капусты определено содержание нитратов и нитритов. Установлено, что при выращивании культуры на поле без дренажной системы с внесением 3 кг биоугля происходит минимальная миграция соединений азота в растение.

Ключевые слова. Биоуголь. Азот. Агропочвы. Биомасса.

Введение

В настоящее время в сельском хозяйстве применяются немало удобрений, содержащих в себе азот, а также его различные соединения. Все это негативно сказывается на состоянии не только почвы, но и атмосферы. В результате процессов, происходящих в почве, в атмосферу высвобождается огромное количество парниковых газов, среди которых закись азота. Именно данный парниковый газ в большей степени разрушает озоновый слой, который защищает нас от губительных ультрафиолетовых лучей. Для того чтобы уменьшить высвобождение парниковых газов, а также для сохранения азота в почве, которой в свою очередь необходим растениям, в сельском хозяйстве в последние время стали применять биоуголь.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны агропочвы (агротемногумусовые подбелы) Приморской овощной опытной станции (п. Суражевка) на экспериментальном участке с дренажной (Др) и бездренажной (Бдр) системами (глубина дренажа 120 см) и биомасса поздней капусты, собранной с экспериментальных участков. В качестве мелиоранта для улучшения порозности почв использовали биоуголь, произведенный из древесных остатков березы *Betula alba* (Попова и др., 2019). Дозы внесения биоугля на экспериментальных площадках составляли 1 и 3 кг м⁻².

Определение нитратной формы азота в данных почвах производилось известным методом Грандваль-Ляжу, с помощью которого можно наиболее просто и точно определить количество нитратного азота в почве. Метод основан на взаимодействии нитратов с дисульфифеноловой кислотой с образованием тринитрофенола (пикриновая кислота), который в щелочной среде даёт жёлтую окраску за счёт образования тринитрофенолята калия (или натрия в зависимости от используемой щёлочи) в количестве, эквивалентном содержанию нитратов. Интенсивность окраски определяют на фотоколориметре. Определение аммонийного азота проводилось колориметрическим методом, основанным на взаимодействии хлорида аммония с реактивом Несслера, при котором образуется йодистый меркураммоний, окрашенный в желтый цвет. По

интенсивности окраски можно судить о содержании аммонийной формы азота (ГОСТ 26488-85; Аринушкина, 1961).

Для определения содержания нитратов и нитритов в культуре использован кочан и корень капусты. Определение содержания нитратов проводили по МУ 5048-89. Сущность метода состоит в извлечении нитратов из анализируемого материала раствором алюмокалиевых квасцов с последующим измерением их концентрации в полученной вытяжке с помощью ионоселективного электрода. При анализе капусты для разрушения примесей (хлоридов), мешающих определению нитратов, дополнительно проводили их окисление марганцевокислым калием. Определение содержания нитритов проводили по ГОСТ 29270-95. Метод основан на экстракции нитратов из продукта, восстановлении их до нитритов с последующим фотометрированием раствора азосоединения, образующегося при взаимодействии нитритов с ароматическими аминами.

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что в начале вегетационного периода агропочвы обладают высоким содержанием нитратного азота (таблица 1). В контроле дренажной системы его значение составило 17,28 мг 100 г⁻¹ почвы, в системе без дренажа - 18,15 мг 100 г⁻¹ почвы. Аммонийного азота во всех объектах исследования содержится незначительно и не превышает 0,198 мг 100 г⁻¹ почвы. В конце вегетационного периода содержание нитратного азота в контрольных образцах дренажной системы составил 8,12 мг 100 г⁻¹ почвы, а в системе без дренажа 6,1 мг 100 г⁻¹ почвы. Наблюдается снижение нитратного азота почти в два раза. Видимо, связано это с большой подвижностью самих нитратов и как следствие возможным вымыванием их из почвы, либо выносом с урожаем. В образцах с внесением биоугля значение нитратного азота возрастают. В дренажной системе где вносился 1 кг биоугля NO₃⁻ составляет 8,12 мг 100 г⁻¹ почвы, а в дозе 3 кг биоугля – 9,42 мг 100 г⁻¹ почвы. Показатели аммонийного азота в конце вегетационного периода в контролях незначительно возрастают до 0,51 мг 100 г⁻¹ почвы. Однако его значения в образцах с внесением 1 и 3 кг биоугля выше и доходит до 1,27 мг 100 г⁻¹ почвы. Известно, что содержание азота в почве зависит от количества органического вещества, прежде всего гумуса. Следовательно, чем больше гумуса содержат почвы, тем больше в них азота (Тюрин, 1965).

Таблица 1. Некоторые агрохимические показатели агропочв
в начале и в конце вегетационного периода.

Объект исследования	NH ₄ мг 100 г ⁻¹ почвы	NO ₃ , мг 100 г ⁻¹ почвы	pH _{H2O}	C, %	NH ₄ , мг 100 г ⁻¹ почвы	NO ₃ , мг 100 г ⁻¹ почвы	pH _{H2O}	C, %
	май 2018				октябрь 2018			
Др к	0,16	18,15	6,67	2,05	0,51	6,78	7,14	2,1
Др к 1 кг	0,16	18,15	6,67	2,05	0,51	8,12	6,98	2,6
Др к 3 кг	0,16	18,15	6,67	2,05	1,27	9,42	6,82	2,8
Бдр к	0,18	17,28	6,8	2,62	0,51	6,61	6,65	2,62
Бдр к 1 кг	0,18	17,28	6,8	2,62	0,86	6,66	6,95	2,5
Бдр к 3 кг	0,18	17,28	6,8	2,62	1,16	7,3	6,81	2,4

Содержание углерода в агропочвах в контролях практически не изменяется, его содержание в начале вегетационного периода в дренажной системе составило 2,05 %, а в конце 2,1 %. В системе без дренажа содержание общего углерода не изменилось и осталось в неизменном состоянии 2,62 % как в начале, так и в конце вегетации (таблица 1). Однако в образцах, где вносился биоуголь видно заметное его увеличение в конце вегетации в дренажной системе и составило с внесением 1 кг биоугля 2,6 %, а 3 кг - в 2,8 %. Возможно внесение биоугля способствовало накоплению углерода в почве, а, следовательно, это могло повлиять также на увеличение нитратного и аммонийного азота. Кислотно-щелочные свойства остаются в диапазоне от нейтральной до слабо щелочной реакции среды. Однако можно наблюдать не значительное увеличение $pH_{вод}$ в сторону нейтральной реакции среды в образцах, где применяли биоуголь, особенно положительное влияние наблюдается в дренажной системе, где показатель $pH_{вод}$ с внесением 1 и 3 кг биоугля в начале вегетации составил 6,67, а в конце вегетационного периода 6,98 и с внесением 3 кг биоугля 6,82. Данные изменения могут быть связаны с активной деятельностью во время вегетации, а также влиянием наличия дренажной системы.

Содержание нитритов в биомассе и корне капусты составляет 0,003–0,064 мг кг⁻¹ (таблица 2). При добавлении биоугля наблюдается увеличение содержания нитритов в корне культуры. Максимальное содержание нитритов в корне наблюдается у образца с дренажного поля с добавлением 1 кг биоугля и составляет 0,064 мг кг⁻¹, что больше в 3,3 раза в сравнении контрольным образцом.

Таблица 2. Содержание нитритов в поздней капусте, мг кг⁻¹.

Экспериментальный участок	Кочан	Корень
Др к	0,021	0,019
Др к 1 кг	0,008	0,064
Др к 3 кг	<0,003	-
Бдр к	<0,003	<0,003
Бдр к 1 кг	<0,003	-
Бдр к 3 кг	0,005	0,011

Исследования показали, что содержание нитратов в кочане капусты (рисунок 1) неоднородно, однако не превышает ПДК (500 мг кг⁻¹) у всех образцов. В корне содержание нитратов не нормируется. Значения показателя в корне выше, чем в кочане капусты, в 2,4-3,7 раз. Максимальные значения наблюдаются у контрольного образца на поле с дренажной системой (698 мг кг⁻¹, в 3,7 раза больше, чем в кочане капусты). При внесении биоугля в почву в корне капусты содержание нитратного азота снижается и составило на полях с дренажной системой с внесением 1 кг биоугля 440 мг кг⁻¹, а 3 кг - в 401,5 мг кг⁻¹. На поле без дренажной системы добавление 3 кг биоугля приводит к более низким значениям. Можно отметить, что большинство нитратного азота остается в корне, при этом в кочане содержание невысоко и составляет 0,23-0,37 ПДК. Вероятно, внесение биоугля снижает миграцию азота из почвы в растение. Минимальные значения в корне и кочане капусты (116 и 277 мг кг⁻¹ соответственно) наблюдаются у образца с поля без дренажной системы с добавлением 3 кг биоугля.

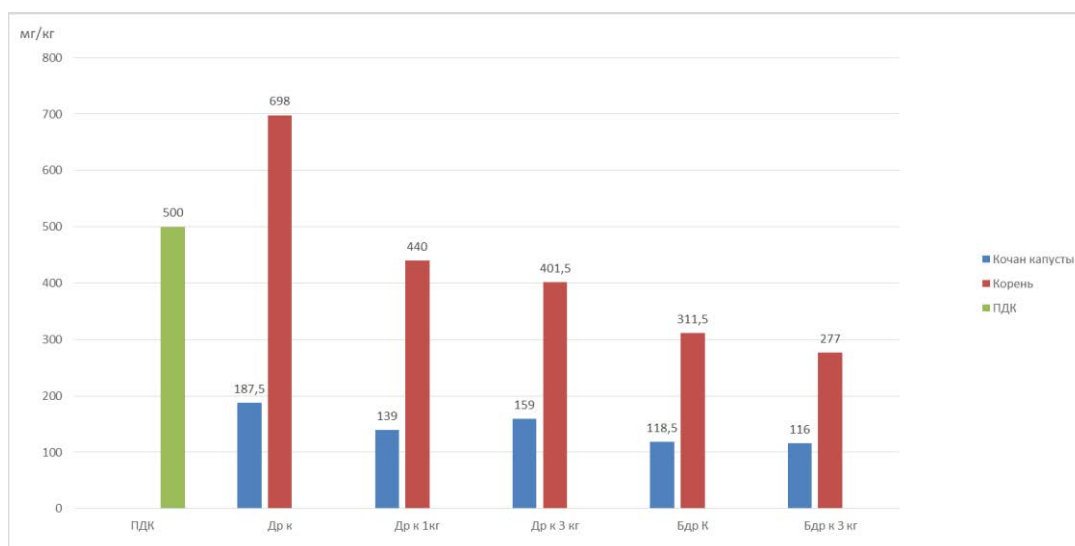


Рис. 1. Содержание нитратов в кочане капусты и корне (поле без дренажной и с дренажной системой): Др – дренаж, Бдр – без дренажа, 1 кг и 3 кг – количество внесенного биоугля.

Выводы

В начале вегетационного периода наблюдается высокое содержание нитратного азота в агропочвах на полях с дренажной и без дренажной системы. Содержание аммонийного азота не превышает $0,198 \text{ мг } 100 \text{ г}^{-1}$. В конце вегетационного периода наблюдается общее снижение нитратного азота в агропочве, однако внесение биоугля приводит к более высокому содержанию азота и углерода по отношению к контрольным образцам, снижается поступление азота в растения. На поле без дренажной системы с внесением 3 кг биоугля происходит минимальная миграция соединений азота в корневую систему и кочан капусты.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05166.

Список литературы

- ГОСТ 26488-85. (1985) Почвы. Определение нитратов по методу ЦИНАО. Издательство стандартов, Москва. 5 с.
- МУ 5048-89. (1989) Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства. Изд-во Министерство здравоохранения СССР, Москва. 18 с.
- ГОСТ 29270-95. (2010) Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения нитратов (с поправкой). Изд-во Госстандарт России, Москва. 15 с.
- Аринушкина Е.В. (1961) Руководство по химическому анализу почв. Изд-во МГУ, Москва. 491 с.
- Попова А.Д., Семаль В.А., Брикманс А.В., Нестерова О.В., Колесникова Ю.А., Бовсун М.А. (2019) Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. № 6: 57-63.

Тюрин И.В. (1965) Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. Изд-во Наука, Москва. 322 с.

INFLUENCE OF BIOCHAR ON THE CONTENT OF SOME FORMS OF NITROGEN IN SOIL AND CABBAGE BIOMASS

BELAIA A. A.¹, PATRUSHEVA. O. V.¹, NESTEROVA. O.V.¹, BRIKMANS A.V.¹

¹ FSAEI HE FEFU, Vladivostok

belaia.aa@students.dvfu.ru

Abstract. The objects of the study were agricultural soils and cabbage collected from the experimental fields. The content of nitrogen compounds (NH_4^+ and NO_3^-), the percentage of carbon and pH values were measured for the soils. In the samples of cabbage, the content of nitrates in the root and leaf of cabbage was determined. Different rates of biochar were studied and it was shown that application of 3 kg of biochar into the soil of the field without a drainage system resulted in the minimal migration of nitrogen compounds from the soil into the plant.

Keywords. Biochar. Nitrogen. Agricultural soils. Cabbage. Nitrates. Nitrites

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ БИОУГЛЯ В ДРЕНАЖНОЙ И БЕЗДРЕНАЖНОЙ СИСТЕМЕ НА ЭМИССИЮ CO₂ И CH₄ ИЗ ПОЧВ

БОВСУН М.А.¹, НЕСТЕРОВА О.В.¹, СЕМАЛЬ В.А.^{1,2}, БРИКМАНС А.В.¹, САКАРА Н.А.³

¹ ДВФУ, Владивосток,

² ФГБНУ Центр биоразнообразия ДВО РАН, г. Владивосток

³ Приморская овощная опытная станция — филиал ФГБНУ «ФНЦ овощеводства»

bovsun.ma@dvfu.ru

Аннотация. Результаты исследования свидетельствуют о положительном действии биоугля на уменьшение эмиссии из почвы CO₂ после 53 дней после внесения. Основное действие биоугля на почву основано на его особой поровой структуре, благодаря которой он подобно действию дренажной системы может поглощать значительную массу воды, что является очень актуальным для переувлажненных почв, в том числе для почв Приморского края. Отведение лишней влаги ведет к улучшению водно-воздушного режима почвы и, соответственно, к увеличению микробиологической активности и увеличению секвестрационной способности почв.

Ключевые слова. Биоуголь. Эмиссия углекислого газа. Кумулятивный поток. Дренаж. Почва. Приморский край.

Введение

Внедрение низкоуглеродных технологий в сельское хозяйство России и сохранение почвенного плодородия становится все более актуальным. Поиск новых технологий, при которых обработка почвы становится минимальной, а усвоение углерода внутри почвенных циклов становится более полным, выходит на первый план современных агроэкологических исследований.

Большинство почв Дальневосточного региона являются тяжелыми по гранулометрическому составу и при механической обработке теряют агрономически ценную структуру, за счет чего уменьшается противоэрозионная устойчивость и ухудшается водно-воздушный режим в прикорневой зоне растений. В первую очередь это касается овощных культур, урожай которых зависит не только от количества питательных элементов, но и от их доступности для растений за счет оптимальных условий в пахотном слое почв. Поиск экологически чистых и недорогих структуров почвы, внедрение их в агроэкосистемы, оценка эмиссии парниковых газов в сельскохозяйственном производстве являются новыми исследовательскими задачами для почвоведов 21 века.

Считается, что внесенный в почву биоуголь при применении на землях сельскохозяйственного назначения благодаря секвестрации способен уменьшать количество выбросов парниковых газов. Однако существуют исследования, не подтверждающие секвестрационные свойства биоугля, что ставит под сомнение теорию его положительного действия.

Биоуголь – это высокоуглеродистый и высокопористый продукт, который получают при пиролизе биомассы. Благодаря своей углеродистой высокопористой структуре он способен улучшать водоудерживающую способность и увеличивать площадь поверхности почвы (Sohi et al., 2009), он обладает рядом физико-химических свойств, влияющих на pH, почвенную агрегацию, доступность питательных веществ, доступность органического углерода (Lehman et

al., 2015), а также способствует росту растений, увеличивает урожайность культур и уменьшает количество загрязняющих веществ (Ding et al., 2016). Тем не менее, существует множество видов биоугля, имеющих широкий диапазон физических и химических показателей, в разной степени влияющих на свойства почв.

В условиях полевого вегетационного опыта исследовано действие биоугля, а также его взаимодействие с дренажной и бездренажной системами, на эмиссию углекислого газа.

Объекты и методы исследования

Полевой опыт был заложен в июне 2018 года на территории ООО «Приморской овощной опытной станции ВНИИО» в с. Суражевка, Приморский край (Рис.1).

Поле без дренажной системы			Поле с дренажной системой		
BC 0 кг	BC 1 кг	BC 3 кг	BC 0 г	BC 1 кг	BC 3 кг

Рис. 1. Схема опыта

Почвы на исследуемых участках представлены агроземом текстурно-дифференцированным (темногумосовый подбел) (Anthric Luvisol) (55 % физического песка, 45% физической глины – бездренажное поле; 62% физического песка, 38% физической глины – дренажное поле). Для исследования был выбран биоуголь, произведенный из древесных остатков березы *Betula alba* методом пиролиза при температуре 360-380 °С. Биоуголь в дозах 0 кг м⁻² (контроль), 1 кг м⁻² и 3 кг м⁻² вносили на опытные участки на поля с дренажной и бездренажной системами. В рамках данной работы представлены результаты эмиссии CO₂ после одного и двух месяцев после внесения биоугля. Измерение эмиссии проводилось непосредственно в полевых условиях камерным методом в четырехкратной повторности при помощи портативного трехгазового анализатора Picarro G4301 (Picarro, USA).

Расчёт эмиссии проводился в программе MS Excel, согласно следующей формуле:

$$F_{\text{gas}} = \frac{\frac{\Delta[\text{Gas}]}{\Delta t} * V * \rho}{A},$$

где F_{gas} – Линейный поток исследуемого газа (CO₂) в $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; $\frac{\Delta[\text{Gas}]}{\Delta t}$ - количество частиц газа в момент времени t , выраженное в $\mu\text{моль моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$; V – общий объем камеры, м³; A – площадь исследуемой поверхности, м²; ρ – молярная плотность воздуха (моль м⁻³), определяемая как P/RT , где P – давление воздуха, Па; R – универсальная газовая постоянная равная 8,31 Па*м³*моль⁻¹К⁻¹; T – температура воздуха, К.

Достоверность потоков определялась согласно коэффициенту детерминации R_2 .

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований выявлено лучшее действие биоугля на уменьшение эмиссии CO₂ на участках без действия дренажной системы. Так, на участке без дренажной системы внесение биоугля в дозе 1 кг м⁻² привело к снижению кумулятивного потока CO₂ на 35,78% по сравнению с контролем (участок без внесения биоугля). На участке с дозой внесения биоугля 3 кг м⁻² снижение кумулятивного потока составило 50,15% по сравнению с контролем.

На участках с действием дренажной системы внесение биоугля привело к увеличению значения кумулятивного потока на 9,53% в варианте опыта с внесением 1 кг м⁻² биоугля и на 7,36% в варианте опыта с дозой внесения биоугля 3 кг м⁻² по сравнению с контрольным участком. Сравнение значений кумулятивных потоков CO₂ контрольных участков дренажной и бездренажной систем показало, что значение кумулятивного потока на контрольном участке без действия дренажной системы на 41,85% больше, чем значение кумулятивного потока на контрольном участке с действием дренажной системы. Таким образом видно, что начальное значение потока на 53 день применения биоугля контрольного участка с дренажной системой приближено к значению кумулятивного потока на участке без действия дренажной системы с внесением 1 кг м⁻² биоугля (рис. 2).

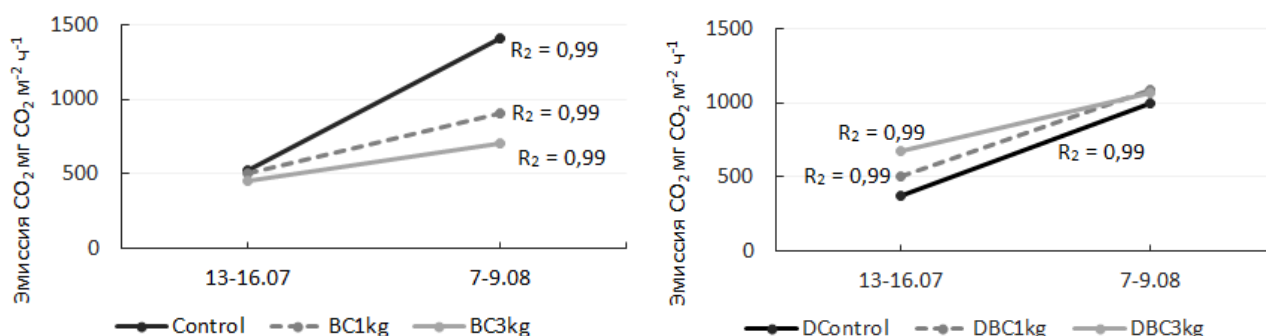


Рис. 2. Кумулятивный поток CO₂ из агротемногумусовых подбелов при внесении биоугля и его действию в течение 53 дней исследования.

Основное действие биоугля на почву основано на его особой поровой структуре, благодаря которой он подобно действию дренажной системы может поглощать значительную массу влаги, что является очень актуальным для переувлажненных почв, в том числе для почв Приморского края. Отведение лишней влаги ведет к улучшению водно-воздушного режима почвы и, соответственно, к увеличению микробиологической активности, а также увеличению секвестрационной способности почв. Таким образом, сравнение кумулятивных потоков контрольных участков свидетельствует, что дренажная система имеет хороший секвестрационный эффект. Внесение биоугля на участках с дренажной системой ведет к увеличению кумулятивного потока CO₂, вероятно связанному с отрицательным взаимодействием (мешающим действием) биоугля с дренажной системой.

Выводы

Полученные результаты исследования в целом свидетельствуют о положительном действии внесения биоугля в почву на эмиссию CO₂ после 53 дней применения, однако положительный эффект внесения биоугля при долгосрочном применении на эмиссию углекислого газа остается открытым и нуждается в более долговременных исследованиях.

Благодарности

Исследования были проведены при поддержке гранта РФФИ №19-29-05166\19.

Список литературы

1. Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z., Tan X., Huang X., Zeng G., Zhou L., Zheng B. (2016) Biochar to improve soil fertility. A review// Agron. Sustain. Dev. – 18 p.
2. Lehmann J., Kuzyakov Y., Pan G., Ok Y. S. (2015) Biochar and the plant-soil interface// Plant Soil. Vol. 395. 1-5.
3. Sohi S., Lopez-Capel E., Krull E., Bol R. (2009) Biochar, climate change and soil: A review to guide future research// CSIRO Land and Water Science Report. 57 p.

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА СЕЗОННУЮ ДИНАМИКУ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОРМ АЗОТА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ РАЗНОГО КАЧЕСТВА

БОЙЦОВА Л.В.¹, РИЖИЯ Е.Я.^{1, 2}

¹ ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург,

² ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», Санкт-Петербург,
larisa30.05@mail.ru

Аннотация. Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре опытной станции ФГБНУ АФИ (п. Меньково, Гатчинский район, Ленинградская область) на дерново-подзолистых супесчаных почвах разной окультуренности. Средне окультуренная почва (СОК) - навоз не вносили, и высоко окультуренная (ВОК) – внесено 540 т г⁻¹ навоза крупного рогатого скота в 2003-2005 гг. Фракции биоугля <2 см в диаметре вносили в верхний 10-см слой почвы. На делянках возделывалась смесь *Vicia sativa* L. и *Avéna satíva* L. Содержание нитратов и аммонийного азота в почвах определяли колориметрическим методом с использованием спектрофотометра SPEKOL. Установлено сезонное уменьшение содержания минеральных форм азота во всех вариантах до конца сентября, связанное с температурным и влажностным режимом почв. Однако в почвах с биоуглём данное снижение происходило медленнее. Биоуголь способствовал достоверному увеличению содержания минеральных форм азота.

Ключевые слова. Дерново-подзолистая супесчаная почва. Биоуголь. Аммонийный азот. Нитратный азот.

Введение

Минеральные соединения азота служат непосредственным источником питания растений. Внесение биоугля влияет на физические условия почвенной среды и изменяет интенсивность процессов аммонификации и нитрификации, обуславливающих формирование ионов аммония и нитратов. Пока не удается найти устойчивой зависимости между концентрацией данных ионов в почве и наличием в ней биоугля, вследствие сильной изменчивости почвенных условий в течение вегетационного периода. Известно, что скорость процессов аммонификации и нитрификации зависят от температуры, влажности, реакции среды, содержания органического вещества и от многих других характеристик.

Цель исследования – выявить влияние внесения биоугля в дерново-подзолистую супесчаную почву на сезонную динамику в ней минеральных форм азота.

Объекты и методы исследования

Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре опытной станции ФГБНУ АФИ (п. Меньково, Гатчинский район, Ленинградская область) на дерново-подзолистых супесчаных почвах (Моисеев и др., 2013). Почвы участков различались по степени окультуренности: средне окультуренная (СОК) и высоко окультуренная (ВОК). В 2003-2005 гг. в почву СОК навоз крупного рогатого скота не вносили, в почву ВОК внесено 540 т г⁻¹ (Оленченко и др., 2012). Опытные делянки размером 4 м² (2×2 м) заложены в мае 2019 года на парцеллах почв с СОК и ВОК и на контрольных участках. Схема опыта включала: контроль (без биоугля) и почва с биоуглем в дозе 20 т г⁻¹ (или 8 кг на 4 м²). Биоугля представлял собой древесный уголь из березы сорта «Премиум» (1 класса), фракция с размером частиц угля 0,5–5 см. Биоуголь произведен

быстрым пиролизом при температуре 600 °С. Фракции биоугля < 2 см в диаметре, вносили в верхний 10-см слой почвы вручную. На делянках в течение вегетационного периода в качестве тест-объекта возделывалась викоовсяная смесь (*Vicia sativa* L. яровая сорта Львовский и *Avéna sativa* L. яровой сорта Борпус, в соотношении 30:70%, соответственно) из расчета 200 кг га⁻¹ (или по 85 г на 4 м²). Отбор проб проведен с середины мая по конец сентября 2019 года по стандартной методике (Доспехов, 1979) с помощью почвенного бура из слоя 0–10 см. Периодичность отбора проб – каждые 10–12 дней с момента закладки эксперимента.

Среднесуточная температура воздуха за период май – сентябрь 2019 г составила 14,2 °С, сумма осадков – 451,2 мм.

Содержание нитратов и аммонийного азота в почве определяли колориметрическим методом в солевой вытяжке (1 Н раствор KCl) с использованием спектрофотометра SPEKOL.

Результаты и обсуждение

Биоуголь обладает высокой обменной способностью в отношении катионов и высокой поглотительной способностью в отношении молекул воды. Органический углерод, входящий в состав биоугля, может быть использован микроорганизмами, что приводит к увеличению потребности микроорганизмов в минеральном азоте, следствием данного процесса является микробиологическая иммобилизация последнего. Все вышеизложенные свойства биоугля влияют на изменения содержания минерального азота в почве при его внесении.

В опыте с биоуглем содержание аммонийного азота в дерново-подзолистой супесчаной почве СОК постепенно снижалось в течение вегетационного периода, тогда как в вариантах почвы ВОК отмечалось его повышение во время первых двух недель эксперимента и последующее снижение (рис. 1). Данное повышение, вероятно, вызвано большей микробиологической активностью в почвах ВОК после зимне-весеннего периода. ВОК почвы изначально содержали большее количество органического вещества, что способствовало усилению в них биологической активности и усилению развития корневой системы возделываемых культур.

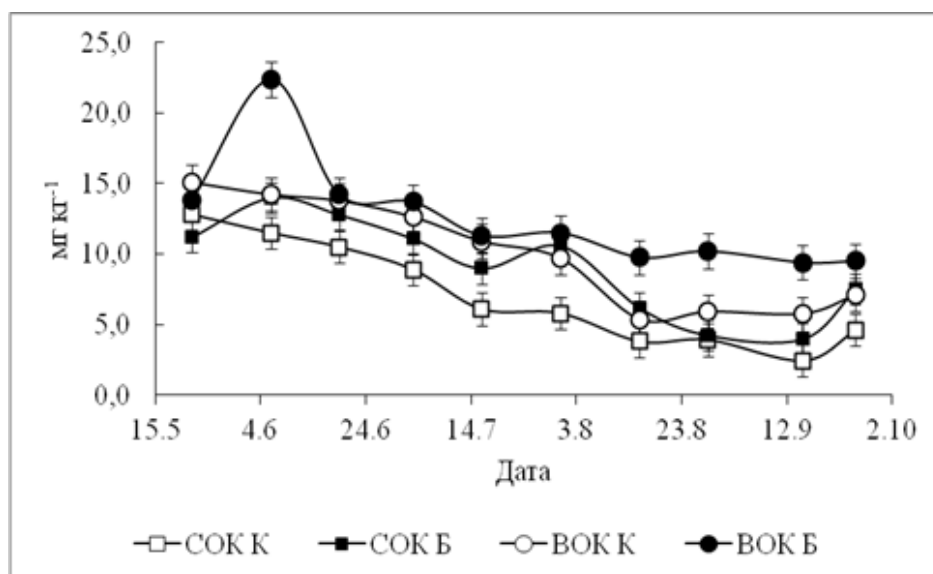


Рис. 1. Динамика содержания аммонийного ($N-NH_4^+$) азота в дерново-подзолистой супесчаной почве со средней (СОК) и высокой (ВОК) степенью окультуренности, в вариантах почвы-контроль (К) и почвы с биоуглем (Б).

Снижение концентрации аммонийного азота в течение вегетационного периода в почвах обуславливается увеличением интенсивности нитрификации, возможной ассимиляцией аммония почвенной биотой и его активным потреблением растениями в период роста. Кроме того, общая тенденция уменьшения содержания N-NH_4^+ в почвах, возможно, связана с изменением воздушного, теплового и водного режимов почвы из-за засухи в июне и июле, которая оказала неблагоприятное влияние на интенсивность микробиологических процессов цикла азота.

Считается, что оптимальная температура для минерализации почвенного органического вещества составляет около 28–30 °С, при падении температуры на 10 °С, её интенсивность уменьшается на 50%. Минерализация органического вещества становится достаточно низкой при низких температурах, и она почти останавливается около 0 °С (Kirschbaum, 2006). Содержание влаги в почве влияет на минерализацию меньше, чем температура почвы. Минерализация более интенсивна, когда чередуются засуха и влажные периоды.

Внесение биоугля привело к повышению содержания аммонийного азота в почве с СОК и ВОК. В вариантах с почвой СОК биоуголь способствовал повышению содержания N-NH_4^+ в среднем на 38%, а в вариантах с почвой ВОК – на 33%. Повышение содержания аммонийного азота в почве с биоуглем может быть связано с адсорбцией N-NH_4^+ на поверхности биоугля, и, как результат, со снижением выщелачивания N-NH_4^+ из почвы. Аналогичные результаты были получены в экспериментах Yao et al. (2012). Кроме того, биоуголь, как мелиорант, обладающий высокой адсорбционной способностью, путем катионного обмена может адсорбировать NO_3^- и NH_4^+ , снижая улетучивание почвенного аммиака и, таким образом, увеличивая содержание доступного азота в почве, улучшая плодородие почвы. Тем не менее, адсорбция аммонийного азота биоуглём может привести к снижению его доступности нитрифицирующим микроорганизмам (Nguyen et al., 2017).

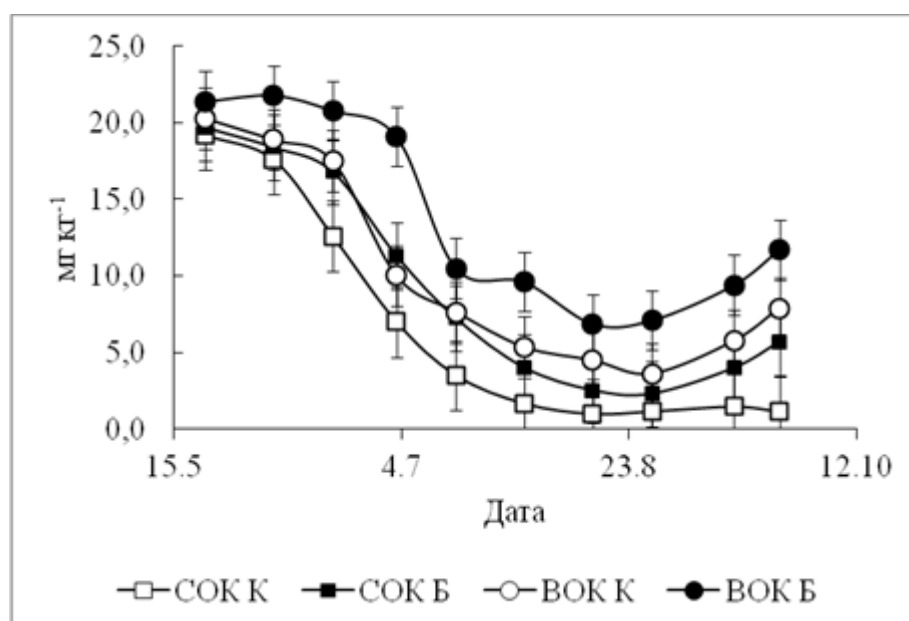


Рис. 2. Динамика содержания нитратного (N-NO_3^-) азота в дерново-подзолистой супесчаной почве со средней (СОК) и высокой (ВОК) степенью окультуренности, в вариантах почвы-контроль (К) и почвы с биоуглем (Б).

Содержание нитратного азота в почве с ВОК было достоверно выше ($p < 0.05$), чем в почве с СОК. В дерново-подзолистой супесчаной почве с СОК наблюдалось снижение содержания нитратного азота в ходе вегетационного периода (рис. 2). В почве ВОК в течение первых 5 недель эксперимента концентрация $N-NH_4^+$ значительно не изменялась, но далее с течением времени наблюдалось её снижение, затем увеличение к окончанию вегетационного периода.

Внесение биоугля в почвы СОК и ВОК привело к накоплению в почве достоверно ($p < 0,05$) большего количества нитратов по сравнению с контрольными вариантами, что, по-видимому, свидетельствует о более интенсивном процессе нитрификации в почвах с биоуглем. Биоуголь, благодаря своей пористой структуре, повышает число аэробных участков в почве, что способствует увеличению интенсивности нитрификации и снижению интенсивности денитрификации. Поэтому увеличивается содержание нитратного азота в почве и снижаются его потери при переходе в газообразную форму. Внесение биоугля в почву с СОК повысило содержание $N-NO_3^-$ в среднем на 120 %, а в почву с ВОК – на 51 %.

Определение содержания минерального азота экстракцией с 2 М KCl в биоугле не позволила получить достоверные результаты. Установлены следы присутствия аммонийного азота и отсутствие нитратов в биоугле. В ранее проведенных экспериментах по изучению сорбции питательных веществ установлено, что биоуголь может поглотить калия в 4 раза больше, чем содержится в растворе. В меньшем количестве усваивается аммоний, фосфор и кальций. Данные элементы поглощаются примерно с одинаковой интенсивностью и количеством. Нитраты и магний практически не сорбировались биоуглем (Рижия и др., 2015).

Выводы

Биоуголь оказал влияние на сезонную динамику минеральных форм азота в почве.

Биоуголь способствовал достоверному увеличению содержания минеральных форм азота.

В целом наблюдалось сезонное уменьшение содержания минеральных форм азота во всех вариантах до конца сентября, связанное с температурным и влажностным режимом почв. Однако в почвах с биоуглем данное снижение происходило медленнее, чем в почве контроля. Так в почве контроля СОК содержание аммония снизилось в 2,8 раза, в почве контроля ВОК в 2,1 раза, а в почве с биоуглем в обоих вариантах в 1,5 раза. В почве контроля СОК содержание нитратов снизилось в 17 раз, в почве контроля ВОК в 2,6 раза, а в почве с биоуглем варианта СОК в 2,6 раза, варианта ВОК в 1,8 раза.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-016-00038 А.

Список литературы

Доспехов Б. А. (1979) Методика полевого опыта. М.: Колос. 419 с.

Моисеев К.Г., Гончаров В.Д., Зинчук Е.Г., Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Гурин П.Д., Старцев А.С., Пищик В.Н. (2013) База данных почвенного покрова Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии (структура почвенного покрова, геоморфологическое строение, физические и геохимические свойства почв) // Свидетельство о государственной регистрации базы №2013620682. Заявка №2013620301. Дата регистрации 06 июня 2013 года.

Оленченко Е.А., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. (2012) Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре. - Агрофизика – № 4. – С. 8–18.

- Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В. (2015) Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент). – Почвоведение. – № 2. – С. 211-220.
- Kirschbaum, M. U. F. (2006) The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate // *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 38, 9: 2510-2518.
- Nguyen T.T.N., Xu C.Y., Tahmasbian I., Che R., Xu Z., Zhou X., Wallace H.M., Bai S.H. (2017) Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and metaanalysis // *Geoderma*. 288:79-96.
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., Zimmerman, A. R. (2012) Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil // *Chemosphere*. Vol. 89. 11: 1467-1471.

INFLUENCE OF BIOCHAR ON SEASONAL DYNAMICS OF MINERAL FORMS OF NITROGEN IN SODDY-PODZOLY SANDY SOILS OF VARIOUS PRODUCTIVITY

BOITSOVA L.V.¹, RIZHIYA E. Ya.^{1,2}

¹ *Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia*

² *Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia*
larisa30.05@mail.ru

Abstract. The vegetation-field experiment was established at the Experimental Station of the Agrophysical Research Institute (Menkovo, Gatchinsky District, Leningrad Region) on soddy-podzolic sandy loam soils of different productivity. Medium-cultivated soil (SOC) - no manure was applied, and highly cultivated soil (WOC) – 540 t ha⁻¹ of cattle manure was applied in 2003 - 2005. Biochar (fractions <2 cm in diameter) was applied to the top 10-cm soil layer. A mixture of *Vicia sativa* L. and *Avéna satíva* L. was cultivated on the plots. The content of nitrate and ammonium nitrogen in soils was determined by the colorimetric method using a SPEKOL spectrophotometer. A seasonal decrease in the content of mineral forms of nitrogen in the soil of all the treatments was found until the end of September. That was associated with the soil temperature and humidity regimes. However, in the soil with biochar, this decrease was happening slower. Biochar contributed to a significant increase in the content of mineral forms of nitrogen in the soil.

Keywords. Sod-podzolic sandy loam soil. Biochar. Ammonium nitrogen. Nitrate nitrogen.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ БИОУГЛЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ РФ

ГУРОВА Т.А.

ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург,
gurova_t@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные научные направления исследований, которые проводятся в научно-исследовательских и образовательных организациях Российской Федерации по применению биоугля в сельском хозяйстве. Проведен обзор литературы, отраженной в научной библиотеке eLibrary.ru за последние три года.

Ключевые слова. Биоуголь; биочар; научные исследования; свойства почвы.

Введение

Издревле на Руси практиковали подсечно-огневое земледелие, однако с развитием цивилизации системы земледелия изменялись, и использование угля в качестве агента, влияющего на плодородие и урожай, не рассматривалось. Исследования по применению биоугля в сельском хозяйстве Российской Федерации ведутся сравнительно недавно. С каждым годом появляются новые публикации, появляется интерес у новых научных коллективов. В данной работе освещаются различные аспекты применения биоугля в сельском хозяйстве, отраженные в научной литературе за последние 3 года.

Результаты и обсуждение

Разумов, Назипова (2015) отмечают, что идея замены каменного угля – ископаемого топлива, биоуглем описана более века назад. Процесс термической обработки древесины изучали Н.И. Никитин и В.Н. Козлов. Однако использование биоугля в сельском хозяйстве в России массового распространения не нашло.

В конце XX века ученые обратили внимание на то, что свойства почв с высоким содержанием биоугля существенно отличались от свойств аналогичных региональных почв. В это время появились первые научные работы по влиянию внесения биоугля на свойства почв, рост и развитие растений.

Все рассмотренные в литературе варианты использования биоугля можно разделить на несколько групп, среди которых исследования, отражающие как свойства самого биоугля, так и его влияние на систему почва-растения-атмосфера.

Ученые Республики Татарстан (Рязанов и др., 2020; Кулагина и др., 2018а) оценивают фитотоксичность биоугля, полученного из осадка сточных вод, рассматривают варианты снижения загрязнения почвы и растений путем повышения температуры пиролиза биоугля.

На экономическую составляющую процесса переработки отходов птицефабрик в биоуголь обращают внимание Р.В. Смирнов и соавторами (2020).

Эксперименты, проведенные Л.М. Сунгатуллиной с соавторами (2019), показывают снижение активности аммонифицирующих микроорганизмов в почвах с биоуглем. В тоже время изменяется соотношение отдельных групп микроорганизмов при внесении различных доз биоугля в серую лесную среднесуглинистую почву при сохранении общей активности микробного сообщества (Кулагина и др., 2018б).

И. Чешик и А. Никитин (2019) предлагают использование почвоулучшающих добавок на основе биоугля и комплекса микроорганизмов (молочнокислые и пурпурные бактерии, дрожжевые грибы) для снижения биодоступности радиоактивного изотопа цезия.

При изучении влияния биоугля на физические свойства почвы рассматривают плотность сложения и водоудерживающую способность почв (Балашов, Рижия, 2020). Улучшение агрегированности, увеличение водопрочности агрономногумусовых почв с естественным водным режимом отмечено в работе А.Д. Поповой с соавторами (2019). Внесение биоугля в среднесуглинистую серую лесную почву способствует уменьшению линейной и объемной усадки (Грачев и др., 2018).

В кислых почвах внесение древесного биоугля приводит к значительному изменению pH среды и обменной кислотности, увеличивается содержание обменных оснований, в том числе кальция (Дубровина, 2019).

Внесение биоугля, не меняя общее содержание калия, обогащает почву наиболее доступными формами калия (водорастворимой и обменной) (Кулагина и др., 2019).

Применение биоугля на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности (Рижия и др., 2020) не оказало влияния на концентрацию аммонийного азота и способствовало увеличению концентрации нитратного азота. В тоже время совместное использование биоугля с сульфатом аммония и компостом снижает потери аммонийного и нитратного азота из темно-серой-лесной почвы (Мухина и др., 2019). Внесение биоугля в сочетании с растительными остатками способствует снижению интенсивности минерализационных процессов в почве (Милосердова и др., 2020).

Изменение агрохимических показателей при внесении биоугля положительно оценивается и в почвах посевного отделения лесных питомников (Дурова, Жигунов, 2018).

Возможности ремедиации техногенно-загрязненных почв с помощью биоугля из лузги подсолнечника рассматривают в Южном федеральном университете (Минкина и др., 2019).

Ученые из Казахстана отмечают снижение содержания Zn, Pb, pH и увеличение NPK в техногенно-загрязненном черноземе с биоуглем (Кермкулова и др., 2019).

Агрономическую оценку внесения биоугля по увеличению урожайности дает А.И. Иванов с соавторами (2020) в условиях модельно-полевого опыта по заделке в тяжелосуглинистую почву осваиваемой залежи продуктов переработки древесно-кустарниковой растительности в форме щепы и биоугля. На усиление линейного роста, повышение продуктивности надземной биомассы ячменя и содержание протеина в зеленой биомассе указывает И.А. Дубровина с соавторами (2020).

Применение биоугля в дерново-подзолистой супесчаной почве, оказывая положительное влияние на почвенно-биологические процессы, приводит к снижению эмиссии парниковых газов (Рижия и др., 2019). Эмиссию парниковых газов также планируют исследовать в лугово-бурой почве в Приморье (Сакара и др., 2019).

Финский ученый М. Хеллштедт (2019) предлагает использование смеси биоугля и торфа для снижения интенсивности запаха от животноводческих ферм.

Основные направления научных исследований по использованию биоугля в сельском хозяйстве, в том числе упомянутые выше, внесены в таблицу.

Таблица. Основные направления исследований по использованию биоугля в сельском хозяйстве.

Изучение свойств биоугля	Оценка влияния на почвы	Оценка влияния на растения	Оценка влияния на атмосферу
Методы получения биоугля	Физические свойства (пористость, плотность сложения, механическая прочность, гигроскопичность, водоудерживающая способность, набухание, агрегатное состояние)	Оценка урожайности	Эмиссия парниковых газов
Элементный состав, зольность, ароматичность, содержание тяжелых металлов	Химические свойства (кислотность, содержание минеральных форм азота, подвижность питательных веществ)	Фитотоксичность	Снижение интенсивности запахов
	Биологические свойства (каталазная, уреазная активность, нитрификация и денитрификация, использование доступного углерода микробным сообществом, изменение таксономического состава и структуры прокариотного сообщества)	Содержание тяжелых металлов в растениях	

Выводы

Различные условия пиролиза биомассы и органических отходов, влекущие за собой получение биоугля с различными свойствами, широкий спектр почв на территории России и сопредельных государств делают перспективными дальнейшие научные исследования по применению биоугля в сельском хозяйстве.

Список литературы

- Балашов Е.В., Рижия Е.Я. (2020) Влияние биоугля на плотность сложения и водоудерживающую способность супесчаной дерново-подзолистой почвы разной степени окультуренности // Агрофизика. № 2. С. 1-6.
- Грачев А.Н., Кулагина В.И., Рязанов С.С., Шагидуллин Р.Р., Сунгатуллина Л.М., Хисамова А.М., Забелкин С.А. (2018) Изменение водопрочности агрегатов и показателей усадки серой лесной почвы при внесении биоугля // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 3 (15). С. 23-27.
- Дубровина И.А. (2019) Динамика физико-химических свойств дерново-подзолистых почв при внесении биоугля // Проблемы агрохимии и экологии. 2019. № 2. С. 19-23.
- Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А. (2020) Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. № 3. С. 31-44.
- Дурова А.С., Жигунов А.В. (2018) Влияние биоугля на показатели плодородия почв и рост сеянцев ели в посевных отделениях лесных питомников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. № 223. С. 140-153.
- Иванов А.И., Иванова Ж.А., Соколов И.В., Вязовский А.А. (2020) Биоуголь в технологиях освоения закустаренной залежи // Агрохимический вестник. № 2. С. 21-26.
- Кермкулова М.Р., Мансуров З.А., Козыбаева Ф.Е., Ошакбаева Ж.О., Кермкулова А.Р. (2019) Использование биоугля для ремедиации техногенно-загрязненных почв // Велес. № 5-1 (71). С. 80-85.

- Кулагина В.И., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Рязанов С.С., Сунгатуллина Л.М., Забелкин С.А., Кольцова Т.Г. (2019) Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия // Аграрный научный журнал. № 1. С. 16-20.
- Кулагина В.И., Грачев А.Н., Рязанов С.С., Кольцова Т.Г., Сунгатуллина Л.М., Рупова Э.Х. (2018а) Оценка фитотоксичности как первый этап эколого-биологической оценки влияния продукта пиролиза илов сточных вод на почвы // Вестник Технологического университета. Т. 21. № 1. С. 164-168.
- Кулагина В.И., Сунгатуллина Л.М., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Рязанов С.С., Забелкин С.А., Кольцова Т.Г. (2018б) Оценка воздействия биоугля на микробиологические и некоторые физико-химические показатели серой лесной почвы // Российский журнал прикладной экологии. № 2 (14). С. 21-25.
- Милосердова В.А., Рижия Е.Я., Орлова Н.Е., Банкина Т.А. (2020) Лабильные соединения углерода и азота, экстрагируемые горячей водой, в дерново-подзолистой почве с биоуглем и растительными остатками // Агрофизика. № 1. С. 23-30.
- Минкина Т.М., Бауэр Т.В., Сушкова С.Н., Бурачевская М.В., Чаплыгин В.А., Лобзенко И.П., Федоренко А.Г. (2019) Перспективы применения биочара для повышения адаптационного потенциала декоративных и плодовых культур в агро- и урбосистемах // Научное обеспечение устойчивого развития плодового и декоративного садоводства. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию ВНИИЦиСК и 85-летию Ботанического сада "Дерево Дружбы". С. 270-274.
- Мухина И.М., Хорак Я., Рижия Е.Я. (2019) Динамика минерального азота в темно-серой лесной почве при совместном внесении биоугля с компостом и сульфатом аммония // Проблемы агрохимии и экологии. № 2. С. 14-18.
- Попова А.Д., Семаль В.А., Брикманс А.В., Нестерова О.В., Колесникова Ю.А., Бовсун М.А. (2019) Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. № 6 (176). С. 57-63.
- Разумов Е.Ю., Назипова Ф.В. (2015) Биоуголь: современное представление // Вестник Технологического университета. Т. 18. № 2. С. 220-222.
- Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. (2020) Влияние биоугля на содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности // Агрохимия. № 8. С. 22-29.
- Рижия Е.Я., Хомяков Ю.В., Мухина И.М., Москвин М.А., Гурова Т.А. (2019) Почвенно-биологические процессы в дерново-подзолистой супесчаной почве с биоуглем // Агрофизика. № 3. С. 26-32.
- Рязанов С.С., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Хайруллина А.М. (2020) Содержание тяжелых металлов в растениях при внесении различных видов биоуглей в серую лесную почву // Российский журнал прикладной экологии. № 3 (23). С. 29-34.
- Сакара Н.А., Колодкин В.Г., Тарасова Т.С., Жильцов А.Ю., Кольев Н.В., Нестерова О.В., Ознобихин В.И. (2019) Основные итоги и перспективы исследований в овощеводческом земледелии в условиях муссонного климата приморья // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. № 3 (205). С. 64-68.
- Смирнов Р.В., Бездудная А.Г., Трейман М.Г. (2020) Инновационная деятельность по переработке производственных отходов на примере птицефабрики // Техничко-технологические проблемы сервиса. № 1 (51). С. 54-60.
- Сунгатуллина Л.М., Кулагина В.И., Грачев А.Н., Рязанов С.С., Шагидуллин Р.Р., Рупова Э.Х. (2019) Коэффициент иммобилизации азота как критерий эколого-биологической оценки воздействия биоугля на почву // Российский журнал прикладной экологии. № 2 (18). С. 49-53.
- Чешик И., Никитин А. (2019) Новые почвоулучшающие добавки для загрязненных радиоактивным цезием земель // Наука и инновации. № 3 (193). С. 21-25.
- Hellstedt M. (2019) Use of biochar-peat mixture to reduce odour from animal farms // Agricultural Machinery and Technologies. 2019. Т. 13. № 2. С. 27-30.

MAIN DIRECTIONS OF RESEARCH ON THE USE OF BIOCHAR IN AGRICULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION

GUROVA T. A.

Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

gurova_t@mail.ru

Abstract. The paper describes the main areas of investigations that are carried out in research and educational organizations of the Russian Federation on the use of biochar in agriculture. The scientific literature for the last 3 years that is listed in the eLibrary database was used for the analyses.

Keywords. Biochar; scientific research; soil properties.

ПРОЛОНГИРОВАННОЕ ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ

ДУБРОВИНА И. А.

*Институт биологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск
vorgo@mail.ru*

Аннотация. В ходе 2х-летнего полевого мониторинга исследовали влияние внесения биоугля на агрохимические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы. Применяли древесный уголь фракции ≤ 1 см в количестве 15 т га^{-1} . В течение вегетационных периодов ежемесячно отбирали образцы почвы и анализировали в них $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} , N-NH_4 , N-NO_3 , P_2O_5 , K_2O , $\text{C}_{\text{орг}}$, $\text{N}_{\text{общ}}$ и C/N . В вариантах с биоуглем отмечен рост водного и солевого pH, увеличение содержания подвижных фосфора и калия, а также органического углерода. Содержание общего азота практически не меняется и наблюдается достоверный рост соотношения C/N почвы. Для показателей нитратного и аммонийного азота характерна большая сезонная и межвариантная изменчивость. Для вариантов с биоуглем получены более высокие уровни N-NH_4^+ и N-NO_3^- , особенно при повышенной температуре воздуха. Для контрольных вариантов отмечена обратная зависимость от количества осадков, когда их повышение ведет к снижению содержания минерального азота.

Ключевые слова. Биоуголь. Кислотность. Подвижный фосфор и калий. Общий и минеральный азот. Органический углерод.

Введение

Многие механизмы взаимодействия биоугля с почвенной средой и влияние его на свойства почв остаются неопределенными, несмотря на широкое исследование биоугля в последние годы. Большой интерес вызывают биогеохимические особенности и динамика биогенных элементов в почвах с применением биоугля. Для понимания отсроченных эффектов использования биоугля в сельскохозяйственной практике необходимо проводить долгосрочные полевые эксперименты и опыты. Особенно это касается почв умеренной зоны и высоких широт, где данные вопросы недостаточно изучены. Целью данной работы было исследование пролонгированного влияния биоугля на основные агрохимические параметры и их динамику в дерново-подзолистой почве легкого гранулометрического состава.

Объекты и методы исследования

Площадки 2-х летнего мониторинга были заложены на участке поля Карельской государственной сельскохозяйственной опытной станции в п. Виданы Пряжинского района Карелии. Участки с биоуглем и контрольные участки площадью 5 м^2 в 4-х кратной повторности расположены на поле рандомизировано. Почва участка дерново-подзолистая супесчаная (агрозем альфегумусовый иллювиально-железистый) нормального увлажнения на озерных песках. По основным агрохимическим показателям почва сильноокультуренная: мощность гумусового горизонта $> 30 \text{ см}$, $\text{pH}_{\text{KCl}} - 6,1$, содержание $\text{C} - 3\%$; $\text{N} - 0,23\%$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 510 \text{ мг кг}^{-1}$; $\text{K}_2\text{O} - 175 \text{ мг кг}^{-1}$. В исследовании использовали уголь древесный (ГОСТ 7657-84), марка А в дозировке $1,5 \text{ кг м}^{-2}$ (15 т га^{-1}), размер фракции $\leq 1 \text{ см}$. Уголь вносили и перекапывали вручную.

Отбор почвенных проб проводили ежемесячно в течение вегетационных периодов 2018–19 гг. С каждого участка отбирали почву с глубины пахотного горизонта 5–20 см методом

«конверта» и анализировали смешанный образец. В образцах анализировали pH_{H_2O} , pH_{KCl} , содержание аммонийного азота ($N-NH_4^+$) в свежем образце и содержание нитратного азота ($N-NO_3^-$) – потенциометрически; содержание подвижного фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) по Кирсанову со спектрофотометрическим окончанием (фосфор) и атомно-эмиссионным окончанием (калий); содержание общего органического углерода (C_{org}) методом высокотемпературного каталитического сжигания; содержание общего азота ($N_{общ}$) по Кьельдалю; рассчитывали соотношение C/N . Для статистической обработки данных применяли t -тест Стьюдента при уровне значимости $p \leq 0,05$ и корреляционный анализ.

Результаты и обсуждение

Изучаемая в данном опыте почва характеризуется высоким уровнем плодородия, однако применение биоугля вносит заметные изменения в базовые агрохимические показатели почвы (таблица). Растет уровень водного и солевого pH на 0,2–0,3 единицы после внесения биоугля несмотря на то, что почва изначально имеет нейтральную реакцию, различия достоверны для всех дат наблюдений. Повышенный уровень pH сохраняется в вариантах с биоуглем в течение двух лет наблюдений.

Биоуголь увеличивает содержание подвижного фосфора, несмотря на высокий уровень обеспеченности почвы этим элементом. Наивысший уровень P_2O_5 отмечен в конце сезона в первый год наблюдений, что можно объяснить как увеличением pH среды, так и сдвигом в составе почвенного микробного сообщества, в том числе увеличением количества групп бактерий, солюбилизирующих почвенные фосфаты (Rafael et al., 2020). Внесение биоугля значительно повышает содержание подвижного калия, в первый год наблюдений в среднем на 30%, а во второй – на 60% к контролю, различия достоверны для всех дат. На второй год наблюдений содержание калия в вариантах с биоуглем увеличивается в два раза, что может быть обусловлено прямым внесением калия в составе биоугля (Дубровина, 2019; Дубровина и др., 2020). Также возможен эффект преобразования малодоступного калия в доступный путем изменения состава глинистых минералов и роста числа бактерий, высвобождающих калий (Zhang et al., 2020).

Содержание углерода в вариантах с биоуглем возрастает, что отмечено многими исследователями (Dong et al., 2018). К концу второго года исследований содержание углерода в вариантах с биоуглем достоверно выше (в 1,2–1,4 раза) чем в контрольных. При этом содержание общего азота практически не меняется, наблюдаются колебания в пределах статистической погрешности. Поскольку при добавлении биоугля в почву содержание углерода растет, а показатели общего азота остаются неизменными, наблюдается достоверный рост соотношения C/N на 15–20% к контролю. Известно, что биоугли с широким соотношением C/N (выше 20–32) стимулируют иммобилизацию почвенного азота (Nguyen et al., 2017).

Содержание минерального азота при внесении биоугля напротив, претерпевает значительные изменения. Минеральный азот в опыте имеет достаточно низкие значения, до 10 $mg\ kg^{-1}$ для $N-NH_4^+$ и до 20 $mg\ kg^{-1}$ для $N-NO_3^-$. Для показателей нитратного и аммонийного азота отмечена большая сезонная и межвариантная изменчивость. Из-за высокой вариабельности значений, различия достоверны не для всех дат. В течение 2-х лет наблюдений, при внесении биоугля содержание в почве $N-NO_3^-$ возрастает от 10 до 50% к контролю в весенне-летний период, особенно сильно в июне-июле и снижается в сентябре. Для контрольных вариантов, напротив, характерны более высокие значения содержания $N-NO_3^-$ в мае и сентябре, а в летние месяцы значения ниже, чем в вариантах с биоуглем.

Таблица. Статистические данные динамики почвенных свойств

Дата/Параметр	pH _{H2O}		pH _{KCl}		P ₂ O ₅ , мг кг ⁻¹	
	контроль	биоуголь	контроль	биоуголь	контроль	биоуголь
16.07.2018	7,3±0,03a	7,5±0,03b	6,1±0,01a	6,2±0,01b	553±19,2a	585±36,8a
16.08.2018	7,2±0,02a	7,4±0,02b	6,1±0,02a	6,2±0,02b	525±10,8a	662±41,8b
20.09.2018	7,2±0,02a	7,4±0,04b	6,1±0,01a	6,2±0,06b	490±20,8a	645±18,9b
15.05.2019	7,2±0,03a	7,5±0,02b	6,1±0,02a	6,2±0,02b	525±17,7a	580±51,5a
20.06.2019	7,2±0,01a	7,5±0,07b	6,0±0,03a	6,3±0,08b	500±20,8a	520±15,0a
17.07.2019	7,1±0,05a	7,4±0,04b	5,9±0,02a	6,2±0,04b	435±11,5a	578±69,3a
20.08.2019	7,2±0,01a	7,5±0,05b	6,0±0,01a	6,4±0,08b	458±3,9a	570±17,6b
18.09.2019	7,0±0,03a	7,3±0,05b	5,9±0,01a	6,3±0,05b	518±7,3a	597±44,8a
Дата/Параметр	K ₂ O, мг кг ⁻¹		N-NO ₃ , мг кг ⁻¹		N-NH ₄ , мг кг ⁻¹	
	контроль	биоуголь	контроль	биоуголь	контроль	биоуголь
16.07.2018	203±8,9a	243±9,2b	13,1±1,41a	18,9±2,11b	4,5±0,12a	8,5±0,14b
16.08.2018	123±1,5a	196±13,2b	8,5±1,65a	9,4±1,85a	4,8±0,08a	6,4±0,23b
20.09.2018	128±2,0a	179±11,5b	15,2±0,54a	7,9±0,33b	6,4±0,14a	6,1±0,87a
15.05.2019	119±8,0a	222±15,1b	10,3±1,23a	8,8±0,90a	1,4±0,57a	1,8±0,27a
20.06.2019	135±20,5a	324±35,4b	7,3±0,85a	11,1±2,51a	4,7±0,64a	8,9±1,61b
17.07.2019	148±21,3a	375±10,8b	6,3±0,72a	12,8±1,15b	0,2±0,05a	4,5±0,27b
20.08.2019	114±10,6a	407±20,9b	6,6±1,37a	8,4±0,72a	0,2±0,12a	6,2±0,37b
18.09.2019	121±16,4a	338±26,2b	13,0±2,04a	9,4±0,40a	0,1±0,01a	3,3±1,08b
Дата/Параметр	C _{орг} , %		N _{общ} , %		C/N	
	контроль	биоуголь	контроль	биоуголь	контроль	биоуголь
16.07.2018	3,2±0,11a	3,8±0,15b	0,23±0,01a	0,23±0,01a	16,3±0,33a	19,3±0,53b
16.08.2018	3,1±0,01a	3,4±0,05b	0,22±0,01a	0,22±0,01a	16,5±0,26a	18,0±0,12b
20.09.2018	2,9±0,16a	3,7±0,15b	0,22±0,01a	0,23±0,02a	15,8±0,47a	19,2±0,29b
15.05.2019	3,1±0,07a	3,7±0,21b	0,10±0,01a	0,20±0,01a	19,3±0,16a	23,2±0,47b
20.06.2019	2,7±0,07a	3,9±0,17b	0,20±0,01a	0,22±0,01a	15,4±0,20a	20,6±0,03b
17.07.2019	2,9±0,07a	3,5±0,10b	0,20±0,01a	0,20±0,01a	17,4±0,28a	20,1±0,44b
20.08.2019	2,9±0,03a	3,8±0,11b	0,20±0,01a	0,22±0,01a	17,1±0,45a	20,0±0,72b
18.09.2019	3,1±0,15a	4,1±0,17b	0,21±0,01a	0,23±0,01a	17,3±0,71a	20,9±0,46b

Примечание: Представлены данные среднего арифметического (n=4) ± ошибка среднего. Разными буквами обозначены статистически значимые отличия между контролем и вариантом с биоуглем.

Содержание N-NH₄⁺ при применении биоугля в первый год наблюдений возрастает практически во все даты наблюдений от 25 до 45% к контролю. Особенно заметны различия в содержании аммонийного азота во второй год наблюдений, когда количество N-NH₄⁺ в контрольных вариантах уменьшается практически до нулевых значений, а в вариантах с биоуглем остается на прежнем уровне.

В вариантах с биоуглем отмечена четкая зависимость содержания минерального азота от температуры воздуха (замер в день отбора образцов). При повышении температуры воздуха содержание азота в данных вариантах увеличивается (r =0,72 для N-NO₃⁻ и r =0,87 для N-NH₄⁺), т.е. усиливается микробиологическая активность, нитрифицирующая и аммонифицирующая способность почвы. Известно, что внесение биоугля ведет к снижению кислотности и улучшению водно-воздушного режима почвы, что в сочетании с оптимальными температурами стимулирует развитие нитрификаторов (Prommer et al., 2014). Для контрольных вариантов характерна

обратная зависимость от количества осадков (сумма в мм за 2 недели до отбора образцов), когда повышенное их количество ведет к снижению содержания азота, особенно аммонийного ($r = -0,48$ для $N-NO_3^-$ и $r = -0,66$ для $N-NH_4^+$). Такие закономерности можно объяснить стабилизирующей ролью биоугля для минерального азота. Известно, что добавки биоугля в почву снижают выщелачивание минерального азота. Это объясняется как химической сорбцией функциональными группами, так и физической адсорбцией в микропорах биоугля (Zheng et al., 2013; Oladele et al., 2019).

Выводы

В ходе двухлетнего полевого мониторинга было установлено, что внесение биоугля в количестве 15 т га^{-1} в сильноокультуренную дерново-подзолистую супесчаную почву оказывает заметное влияние на основные агрохимические параметры и их динамику. Растет уровень водного и солевого pH, содержание подвижного фосфора, калия и органического углерода. Для показателей pH_{KCl} , калия и углерода характерен эффект последствия внесения биоугля на второй год исследований. Поскольку содержание общего азота практически не меняется, наблюдается достоверный рост соотношения C/N. Для показателей нитратного и аммонийного азота отмечена большая сезонная и межвариантная изменчивость. В целом для вариантов с биоуглем характерны более высокие уровни $N-NH_4$ и $N-NO_3^-$, особенно при повышенной температуре воздуха, когда усиливается микробиологическая активность, нитрифицирующая и аммонифицирующая способность почвы. Для контрольных вариантов характерна обратная зависимость от количества осадков, когда их повышение ведет к снижению содержания азота, особенно аммонийного, что подтверждает стабилизирующую роль биоугля для минерального азота.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания (0221-2017-0047) с использованием оборудования ЦКП КарНЦ РАН.

Список литературы

- Дубровина И.А. (2019) Динамика физико-химических свойств дерново-подзолистых почв при внесении биоугля // Проблемы агрохимии и экологии. № 2: 19–23.
- Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А. (2020) Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // Труды КарНЦ РАН. № 3: 31–44.
- Dong X., Singh B.P., Li G., Lin Q., Zhao X. (2018) Biochar application constrained native soil organic carbon accumulation from wheat residue inputs in a long-term wheat-maize cropping system // Agriculture Ecosystems & Environment. Vol. 252: 200–207.
- Nguyen T.T.N., Xu C.-Y., Tahmasbian I., Che R., Xu Z., Zhou X., Wallace H.M., Bai S.H. (2017) Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis // Geoderma. Vol. 288: 79–96.
- Oladele S.O., Adeyemo A.J., Awodun M.A. (2019) Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils // Geoderma. Vol. 336: 1–11.
- Prommer J., Wanek W., Hofhans, F., Trojan D., Offre P., Urlich T., Schleper C., Sassmann S., Kitzler B., Soja G., Nowotny R.C.H. (2014) Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial // PLoS One. Vol. 9, 1: 1–16.
- Rafael R., Fernández-Marcos M.L., Cocco S., Ruello M.L., Fornasier F., Corti G. (2020) Increased phosphorus availability to corn resulting from the simultaneous applications of phosphate rock, calcareous rock, and biochar to an acid sandy soil // Pedosphere. Vol. 30, 6: 719–733.

- Zhang M., Riaz M., Liu B., Xia H., El-Desouki Z., Jiang C. (2020) Two-year study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity // Science of the Total Environment. Vol. 717: 137286.
- Zheng H., Wang Z., Deng X., Herbert S., Xing B. (2013) Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil // Geoderma. Vol. 206: 32–39.

PROLONGED INFLUENCE OF BIOCHAR ON AGROCHEMICAL PROPERTIES OF SODDY-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL

DUBROVINA I. A.

Institute of Biology of the Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia
vorgo@mail.ru

Abstract. The effect of biochar application on agrochemical properties of a soddy-podzolic sandy loam soil was studied during the 2-year field monitoring. Biochar made of wood (fraction ≤ 1 cm) was used with an application rate of 15 t ha^{-1} . Soil samples were collected monthly during the growing seasons and analyzed for $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} , N-NH_4^+ , N-NO_3^- , P_2O_5 , K_2O , C_{org} , N_{tot} and C/N. An increase in water and salt pH, content of available phosphorus and potassium as well as organic carbon was observed in biochar treatments. Total nitrogen content did not change significantly and there was a significant increase in C/N ratio of the soil. Large seasonal and inter-treatment variability was characteristic for the contents of nitrate and ammonium nitrogen. Higher levels of N-NH_4^+ and N-NO_3^- were obtained for the treatments with biochar, especially at elevated air temperatures. An inverse dependence on the amount of precipitation was noted for the control treatments when the increase in precipitation led to a decrease in the content of mineral nitrogen.

Keywords. Biochar. Acidity. Available phosphorus and potassium. Total and mineral nitrogen. Organic carbon.

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА АДсорбЦИЮ ГЕРБИЦИДОВ В ПОЧВЕ

ЖЕЛЕЗОВА А.Д.¹, СЕДЕРЛУНД Х.²

¹ ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Москва

² Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

alferrum@mail.ru

Аннотация. При применении биоугля следует учитывать его адсорбционные свойства, влияющие на биодоступность гербицидов в почве. В лабораторных условиях была исследована адсорбция гербицидов диурона и глифосата в почве после внесения биоугля и его «старения». Адсорбция зависела от химических свойств гербицида. Выявлено уменьшение адсорбции при продолжительной экспозиции биоугля в почве.

Ключевые слова. Глифосат; диурон; старение биоугля.

Введение

Биоуголь, или биочар – это богатое углеродом твердое вещество, полученное из биомассы различного происхождения (древесные опилки, органические отходы, навоз) с помощью пиролиза (неполного сжигания сырья) при температурах от 200 до 800°C в условиях ограниченного присутствия кислорода (Kookana, 2010). Свойства биоугля зависят от использованного сырья и условий пиролиза: биомасса обычно определяет химический состав, количество макропор и содержание питательных веществ, а условия пиролиза (продолжительность, температура) определяют изменения морфологии и структуры поверхности в исходном сырье и соотношение С:Н (Ahmad et al., 2014).

Биоуголь используется для улучшения свойств сельскохозяйственных почв. Однако его адсорбционные свойства позволяют применять его для ремедиации почв и в фильтрационных системах (Ahmad et al., 2014; Biederman and Harpole, 2013; Cayuela et al., 2014). Адсорбция является важным фактором, влияющим на биодоступность гербицидов для растений и микроорганизмов, и, следовательно, на скорость их разложения. Биоуголь может неселективно адсорбировать различные типы органических и неорганических химических веществ благодаря большой площади поверхности и высокой пористости (Herath et al., 2016). Кроме того, наличие конкретных участков адсорбции на поверхности биоугля (многочисленные ароматические структуры внутри частиц и окисленные поверхностные группы с переменным зарядом и гидрофобностью) могут приводить к более избирательным взаимодействиям с гербицидами. Увеличение адсорбции почвой при внесении биоугля наблюдалось для следующих гербицидов: диурон (Yang et al., 2006), бромоксинил и аметрин (Sheng et al., 2005), симазин (Jones et al., 2011), МЦПА - 4-хлор-2-метилфеноксиуксусная кислота (Tatarková et al., 2013), атразин (Martin et al., 2012) и другие хлорорганические пестициды (Ali et al., 2019).

Изменения адсорбционных свойств биоугля могут произойти вследствие продолжительного нахождения в почве – эффект «старения». С одной стороны, сорбирующая способность биоугля может быть увеличена за счет окисления ароматических колец и внедрения кислородсодержащих функциональных групп на поверхности (Joseph et al., 2010), изменения заряда поверхности с увеличением емкости катионного обмена (Cheng et al., 2008), деградации сконденсированных на поверхности гидрофобных материалов и повышения пористости (Trigo et al., 2014). С другой стороны, на поверхность биоугля могут быть адсорбировано лабильное органическое вещество и минеральные частицы, что снижает его потенциал к адсорбции гербицидов (Lin et al., 2012). В большинстве случаев внесение биоугля в почву способствует

увеличению адсорбции, а его «старение» - к снижению (Hale et al. 2012; Martin et al. 2012; Zhang et al. 2016). Однако наблюдается и обратный эффект – сорбция пиклорама заметно возрастает при «старении» биоугля (Gámiz et al., 2019). Характер изменений может зависеть от температуры, при которой проводился пиролиз биоугля (Ren et al., 2018).

Задачей исследования была оценка влияния биоугля на адсорбцию гербицидов диурона и глифосата в почве и его изменение при «старении» биоугля.

Объекты и методы исследования

Отбор почвенных образцов был произведен в сентябре 2015 года на полях у населенного пункта Лэнна (59°52'N, 17°58'E) и в Уппсале, Уллерокер (59°49'N, 17°39'E), Швеция. Почвы полей Лэнна (далее L) и Уллерокер (далее U) отличались по гранулометрическому составу: в почве L преобладала фракция глины (< 0.002 мм), в почве U – фракция песка (0.2-0.6 мм). Почвы двух частей поля у Лэнны различались по проценту органического вещества: фоновая почва (LC) и исторически обогащенная биочаром (LB), в которую вносили древесный уголь (продукт пиролиза биомассы, аналогичный биочару) – побочный продукт производства железной руды. Из-за долгосрочного внесения биочара обогащенная им почва характеризовалась более низкой плотностью и более высокой водоудерживающей способностью, чем необработанная почва того же поля, что приводило к более высоким урожаям в сухие годы (Kihlberg et al., 2010). Образцы каждой почвы из верхнего слоя (5–15 см) отбирали в 5 точках и гомогенизировали.

Для экспериментов был использован биоуголь *Skogens kol*, сделанный из древесной биомассы *Betula* sp. (80%) и *Picea abies* (20%) путём медленного пиролиза с максимальной температурой 380-430 °C (Cederlund et al. 2016).

Биоуголь смешивали с почвой из расчета 1, 10, 20 и 30% биоугля на единицу сухой массы почвы (обозначены L1, L10, L20, L30 и U1, U10, U20, U30). Для смесей определяли предельную полевую влагоемкость и pH. Эксперимент по старению биоугля в почве проводили со смесями на основе почвы U: смеси инкубировали в темноте при 20°C в течение 3,5 месяцев. Содержание влаги доводили до 55% от ППВ и еженедельно контролировали и регулировали путем добавления деионизированной воды.

Для исследования были выбраны два гербицида с различными химическими свойствами – глифосат, преимущественно адсорбируемый на минеральной части почвы, и диурон, адсорбируемый на органическом веществе. Адсорбцию гербицидов определяли согласно методике OECD guideline 106 (OECD, 2000) в градиенте концентраций и рассчитывали коэффициент адсорбции K_F (константу Фрейндлиха). Подробно методика описана в (Zhelezova et al., 2017).

Результаты и обсуждение

Биоуголь увеличивал водоудерживающую способность почвы U с преобладанием фракции песка, однако не оказал воздействия на водоудерживающую способность почвы L с преобладанием фракции глины. Это согласуется с данными других исследований (Hussain et al., 2020). Увеличение водоудерживающей способности происходит за счёт увеличения количества и изменения характера распределения пор. pH обеих почв увеличивалась с количеством внесенного биоугля. В процессе «старения» pH также увеличивалась, что может быть объяснено высвобождением щелочных солей из биоугля (Joseph et al. 2010).

Внесение биоугля увеличило адсорбцию диурона в обеих исследованных почвах. K_F в почве LB составила $364 \text{ мкг}^{-1-1/n} (\text{мг})^{1/n} \text{ г}^{-1}$, что приблизительно соответствовало K_F , полученной для 20% смеси почвы LC с биоуглем. В почве U после «старения» биоугля коэффициент адсорбции

снижался. Выявлены положительные корреляции между процентом внесеного биоугля и адсорбцией диурина в почвах.

Выявлена высокая адсорбционная способность фоновой почвы LC по отношению к глифосату ($K_F = 1218 \text{ мкг}^{1-1/n} (\text{мл})^{1/n} \text{ г}^{-1}$). Не было выявлено влияния количества биоугля в смеси с почвой LC на коэффициент адсорбции (он варьировал в пределах 1099–1294 $\text{мкг}^{1-1/n} (\text{мл})^{1/n} \text{ г}^{-1}$). В почве LB коэффициент адсорбции K_F был снижен (539 $\text{мкг}^{1-1/n} (\text{мл})^{1/n} \text{ г}^{-1}$). В почве U K_F составляла 146 $\text{мкг}^{1-1/n} (\text{мл})^{1/n} \text{ г}^{-1}$. В смесях почвы U с биоуглём коэффициент адсорбции негативно коррелировал с процентом внесённого биоугля, и «старение» биоугля ещё больше уменьшало адсорбцию.

Выводы

При применении биоугля для иммобилизации гербицидов в почве следует учитывать несколько факторов, влияющих на эффективность адсорбции: свойства биоугля, обусловленные его составом и процессом изготовления (температура пиролиза), химические свойства гербицида, изменение свойств в результате «старения».

Благодарности

Автор выражает признательность коллективу лаборатории почвенной микробиологии SLU за содействие в работе.

Список литературы

- Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S., Ok, Y.S. (2014) Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. // *Chemosphere* 99, 19–23. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- Ali, N., Khan, S., Li, Y., Zheng, N., Yao, H. (2019) Influence of biochars on the accessibility of organochlorine pesticides and microbial community in contaminated soils. // *Sci. Total Environ.* 647, 551–560. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.425
- Biederman, L.A., Stanley Harpole, W. (2013) Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. // *GCB Bioenergy* 5, 202–214. doi:10.1111/gcbb.12037
- Cayuela, M.L., van Zwieten, L., Singh, B.P., Jeffery, S., Roig, A., Sanchez-Monedero, M.A. (2014) Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. // *Agric. Ecosyst. Environ.* 191, 5–16. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.009
- Cederlund, H., Börjesson, E., Lundberg, D., Stenström, J. (2016) Adsorption of pesticides with different chemical properties to a wood biochar treated with heat and iron // *Water Air Soil Pollut.* 227, 203.
- Cheng, C.H., Lehmann, J., Engelhard, M.H. (2008) Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. // *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 1598–1610. doi: 10.1016/j.gca.2008.01.010
- Gámiz, B., Velarde, P., Spokas, K.A., Celis, R., Cox, L. (2019) Changes in sorption and bioavailability of herbicides in soil amended with fresh and aged biochar. // *Geoderma* 337, 341–349. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.09.033
- Herath, I., Kumarathilaka, P., Al-Wabel, M.I., Abduljabbar, A., Ahmad, M., Usman, A.R.A., Vithanage, M. (2016) Mechanistic modeling of glyphosate interaction with rice husk derived engineered biochar. // *Microporous Mesoporous Mater.* 225, 280–288. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.01.017
- Hussain, R., Ravi, K., Garg, A. (2020) Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): Potential application in geotechnical engineering structures. // *Soil Tillage Res.* 204, 104713. doi: 10.1016/j.still.2020.104713
- Jones, D.L., Edwards-Jones, G., Murphy, D. V. (2011) Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil. // *Soil Biol. Biochem.* 43, 804–813. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.12.015
- Joseph, S.D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C.H., Hook, J., Van Zwieten, L., Kimber, S., Cowie,

- A., Singh, B.P., Lehmann, J., Foidl, N., Smernik, R.J., Amonette, J.E. (2010) An investigation into the reactions of biochar in soil. // *Aust. J. Soil Res.* 48, 501–515. doi: 10.1071/SR10009
- Kihlberg, T., Hedvigsdotter, M., Petersen, C., Günther, F., Hylander, L.D. (2010) Characteristics of a half century old charcoal rich soil in Sweden. Unpublished Manuscript
- Kookana, R.S. (2010) The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: A review. // *Aust. J. Soil Res.* 48, 627–637. doi:10.1071/SR10007
- Lin, Y., Munroe, P., Joseph, S., Kimber, S., Van Zwieten, L. (2012) Nanoscale organo-mineral reactions of biochars in ferrosol: An investigation using microscopy. // *Plant Soil* 357, 369–380. doi: 10.1007/s11104-012-1169-8
- Martin, S.M., Kookana, R.S., Van Zwieten, L., Krull, E. (2012) Marked changes in herbicide sorption-desorption upon ageing of biochars in soil. // *J. Hazard. Mater.* 231–232, 70–78. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.040
- OECD, 2000. Adsorption - Desorption Using a Batch Equilibrium Method. *Oecd Guidel. Test. Chem.* 1–44. doi: 10.1787/9789264069602-en
- Ren, X., Yuan, X., Sun, H. (2018) Dynamic changes in atrazine and phenanthrene sorption behaviors during the aging of biochar in soils. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 81–90. doi: 10.1007/s11356-016-8101-3
- Sheng, G., Yang, Y., Huang, M., Yang, K. (2005) Influence of pH on pesticide sorption by soil containing wheat residue-derived char. // *Environ. Pollut.* 134, 457–463. doi: 10.1016/j.envpol.2004.09.009
- Tatarková, V., Hiller, E., Vaculík, M. (2013) Impact of wheat straw biochar addition to soil on the sorption, leaching, dissipation of the herbicide (4-chloro-2-methylphenoxy)acetic acid and the growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 92, 215–221. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.02.005
- Trigo, C., Spokas, K.A., Cox, L., Koskinen, W.C. (2014) Influence of soil biochar aging on sorption of the herbicides MCPA, nicosulfuron, terbuthylazine, indaziflam, and fluoroethyldiaminotriazine. // *J. Agric. Food Chem.* 62, 10855–10860. doi: 10.1021/jf5034398
- Yang, Y., Sheng, G., Huang, M. (2006) Bioavailability of diuron in soil containing wheat-straw-derived char. // *Sci. Total Environ.* 354, 170–178. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.026
- Zhang, X., Sarmah, A.K., Bolan, N.S., He, L., Lin, X., Che, L., Tang, C., Wang, H. (2016) Effect of aging process on adsorption of diethyl phthalate in soils amended with bamboo biochar. // *Chemosphere* 142, 28–34. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.05.037
- Zhelezova, A., Cederlund, H., Stenström, J. (2017) Effect of Biochar Amendment and Ageing on Adsorption and Degradation of Two Herbicides. // *Water, Air, Soil Pollut.* 228, 216. doi: 10.1007/s11270-017-3392-7

THE INFLUENCE OF BIOCHAR ON THE ADSORPTION OF HERBICIDES IN SOIL

ZHELEZOVA A. D.¹, CEDERLUND H.²

¹ *Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia*

² *Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden*

*alferrum@mail.ru

Abstract. Biochar adsorption properties affect the bioavailability of herbicides in soils. The adsorption of diuron and glyphosate herbicides in the soil after the biochar addition and its ageing was studied in laboratory conditions. The adsorption depended on the chemical properties of the herbicide. A decrease in adsorption was revealed during prolonged exposure of biochar in soil.

Keywords. glyphosate; diuron; biochar ageing.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ НА ФОНЕ ВНЕСЕНИЯ БИОЧАРА

ЗИНЧЕНКО В.В.¹, ПОГОНЫШЕВ П.Д.¹, АНТОНЕНКО С.А.¹, ФЕДОРЕНКО Е.С.¹, ЛОБЗЕНКО И.П.¹, ГОРОВЦОВ А.В.^{1,2}, МИНКИНА Т.М.¹, СУШКОВА С.Н.¹

¹ ФГАОУ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

² ФГБНУ Федеральный Ростовский аграрный научный центр, п. Рассвет, Российская Федерация

zinj007@gmail.com; gorovtsov@gmail.com

Анотация. Целью данной работы было оценить влияние углеродистого сорбента, в частности биочара внесённого в загрязненную почву поймы реки Северский Донец, и штаммов микроорганизмов, выделенных из данной почвы, на показатели биологической активности почв. Наблюдается процесс ингибирования нитрификации при внесении биочара и штаммов микроорганизмов. Численность актиномицетов возрастает при совместном внесении биочара и штаммов микроорганизмов. Численность спорообразующих микроорганизмов возрастает при внесении смеси штаммов микроорганизмов. Активность дегидрогеназы возрастает при использовании всех вариантов опыта.

Ключевые слова. Биологическая активность. Нитрификационная активность. Спорообразующие микроорганизмы. Дегидрогеназная активность. Загрязнение. Биочар.

Введение

Понятие биологической активности почв включает в себя широкий спектр взаимосвязанных биологических и биохимических процессов. Микроорганизмы, населяющие почву, являются основным субстратом для протекания множества биохимических процессов. Некоторые биохимические процессы протекают во всех группах микроорганизмов определяя их общую активность, некоторые только в определенных группах (Nannipieri et al., 1990).

Нитрификационная активность может оказывать негативное влияние на сельское хозяйство посредством преобразования аммония в нитрат (Beekman et al., 2018). Этим же образом происходит значительная потеря азота, вносимого в виде удобрений. Для снижения нитрификационной активности в сельском хозяйстве используют химические ингибиторы. Однако вместе со снижением активности нитрификации снижается активность и численность групп микроорганизмов, не включенных в цикл азота (Florio et al., 2016).

Дегидрогеназы – группа ферментов, тесно связанных с процессами микробного окисления (Moeskops et al., 2010). Являясь внутриклеточными ферментами, они являются индикаторами активности микробного сообщества почвы. Дегидрогеназы участвуют в биологическом окислении органического вещества почвы путем переноса водорода от органических субстратов к неорганическим акцепторам.

Целью данной работы было оценить влияние биочара на биологические показатели почв в условиях модельного опыта.

Материалы и методы

Объектом исследований являлась лугово-черноземная почва поймы реки Северский Донец, расположенной в Каменском районе Ростовской области. Биочар был произведен из шелухи подсолнечника при конечной температуре пиролиза 500°C научной группой кафедры

почвоведения и оценки земельных ресурсов. Биочар равномерно смешивали с образцами почвы концентрации 2,5% от общего объёма. Совместно с биочаром вносилась смесь штаммов микроорганизмов. Штаммы *Bacillus subtilis*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus cereus* вносились в виде водной суспензии в концентрации 10^{10} КОЕ кг^{-1} . Данные штаммы были выделены из почв оз. Атаманское и проявляют высокий уровень устойчивости к цинку (Gorovtsov et al., 2019). Было сформировано четыре варианта опыта: Контроль; Бактерии; Биочар; Бактерии и Биочар.

Активность двух стадий нитрификации определяли по скорости окисления аммония и нитрита (Sauvé et al., 1999). Для определения активности дегидрогеназ фотометрически измерялось количество трифенилформазана, образовавшегося в ходе восстановления трифенилтетразолийхлорида, после его экстракции этанолом (Kızılkaya et al., 2004). Численность отдельных групп почвенных микроорганизмов определяли путем прямого подсчета колоний на плотных питательных средах.

Результаты и обсуждение

Добавлению штаммов спорообразующих бактерий заметно снижало скорость обеих стадий нитрификации (Рис. 1). Вероятно, это связано в первую очередь с подавлением автотрофных нитрифицирующих бактерий гетеротрофными бактериями (Horsley et al., 1982). Это вызывает активность образования нитритов и нитратов более чем в 2 раза.

При внесении биочара, активность нитрификации также оказывается сниженной, что связано с ростом численности гетеротрофных бактерий при его внесении (Рис. 1, 2).

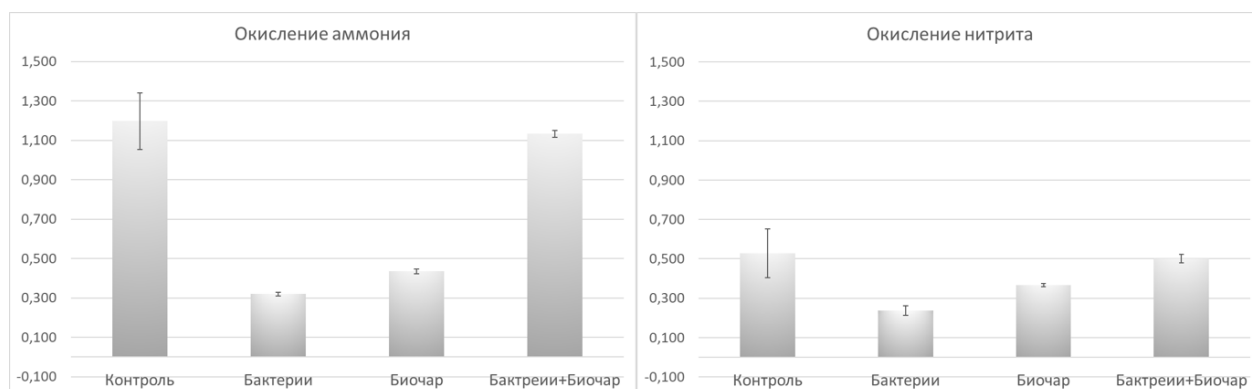


Рис. 1. Активность нитрификации на фоне совместного и раздельного внесения биочара и штаммов спорообразующих бактерий, $\text{мкг N-NO}_2 \text{ г}^{-1}$ абс. сух. почвы час^{-1}

Достоверное снижение скорости окисления аммония наблюдается при совместном использовании штаммов микроорганизмов и биочара (Рис. 1). По-видимому, в данном случае на нитрифицирующие бактерии негативно повлияли внесенные штаммы микроорганизмов. При этом такой вариант опыта не оказывает достоверного влияния на окисление нитрита (Рис. 1).

Данные по численности отдельных групп гетеротрофных микроорганизмов согласуются с представленными выше данными. Внесение спорообразующих бактерий в почву увеличивает их общую численность, однако прирост существенно ниже вносимой дозы. Вероятно, внесенные микроорганизмы не выдержали конкуренции с уже имеющимися в почве видами. Тренд в сторону снижения количества спорообразующих микроорганизмов показывает вариант с совместным внесением ремедиантов по сравнению с вариантом с внесением только штаммов микроорганизмов, что связано с токсичностью продуктов пиролиза (Рис. 2).

Стоит отметить значительный прирост численности спорообразующих микроорганизмов (в 3, 4 раза) при внесении биочара (Рис. 2). Данный прирост обусловлен наличием дополнительных микронизов для колонизации пор биочара.

Биочар не оказывает статистически достоверного влияния на численность актиномицетов, в сравнении с контролем и вариантом с использованием штаммов микроорганизмов. Совместное внесение оказывает стимулирующее влияние на численность актиномицетов (Рис. 2).

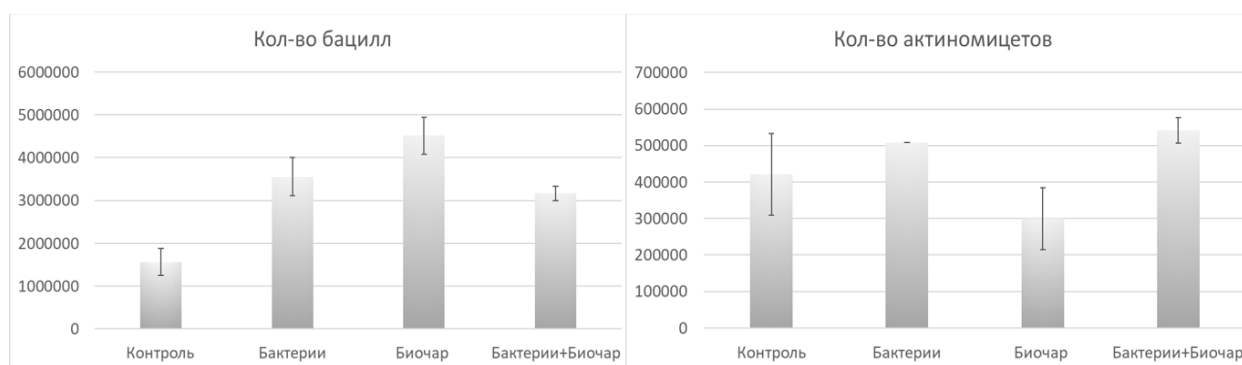


Рис. 2. Численность отдельных групп почвенных микробных сообществ на фоне совместного и раздельного внесения биочара и штаммов спорообразующих бактерий, КОЕ г⁻¹

Раздельное внесение штаммов микроорганизмов и биочара оказывает статистически не достоверное влияние на активность дегидрогеназы, однако превышает значения контрольного образца в 1,5 раза (Рис. 3). Такое возрастание дегидрогеназной активности вероятно отражает снижение токсичности поллютантов для почвенной микробиоты. Совместное использование биочара и штаммов микроорганизмов показывает повышение активности по сравнению с контрольным в 3 раза (Рис. 3). Таким образом, сочетанное использование биочара и штаммов металлоустойчивых микроорганизмов более эффективно в силу взаимного усиления положительного эффекта.

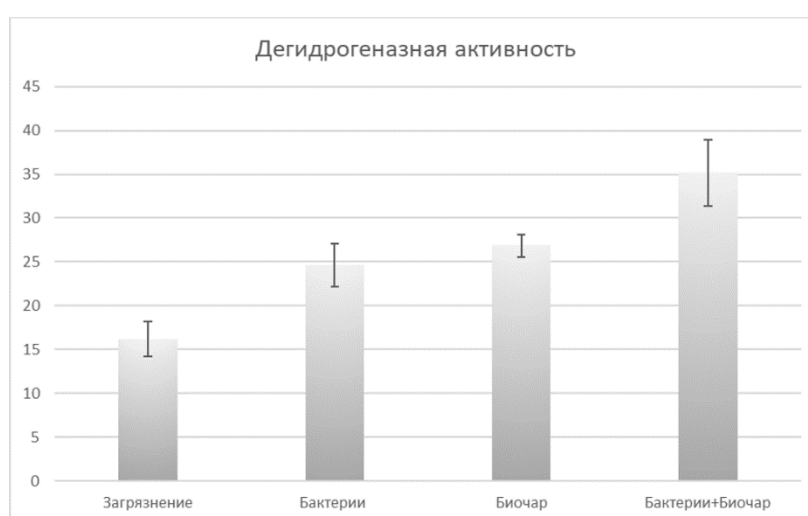


Рис. 3. Активность дегидрогеназы на фоне совместного и раздельного внесения биочара и штаммов спорообразующих бактерий, мкг ТФФ г⁻¹ абс. почвы час⁻¹.

Выводы

Таким образом, биочар эффективно снижает активность нитрификации, повышает количество спорообразующих микроорганизмов и активность дегидрогеназы. Комплексное внесение смеси штаммов спорообразующих микроорганизмов с биочаром демонстрирует снижение численности бацилл, скорости протекания обеих фаз нитрификации по отношению к контрольным образцам. В тех же условиях численность актиномицетов и активность дегидрогеназы возрастают.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект № 19-74-10046.

Список литературы

- Nannipieri P. et al. Ecological significance of the biological activity in soil //Soil biochemistry. – 1990. – Т. 6.
- Beeckman F., Motte H., Beeckman T. Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation //Current opinion in Biotechnology. – 2018. – Т. 50. – С. 166-173.
- Florio A. et al. Changes in the activity and abundance of the soil microbial community in response to the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) //Journal of Soils and Sediments. – 2016. – Т. 16. – №. 12. – С. 2687-2697.
- Moeskops B. et al. Soil microbial communities and activities under intensive organic and conventional vegetable farming in West Java, Indonesia //Applied Soil Ecology. – 2010. – V. 45. – №. 2. – P. 112-120.
- Gorovtsov et al. The role of biochar-microbe interaction in alleviating heavy metal toxicity in *Hordeum vulgare* L. grown in highly polluted soils //Applied Geochemistry. – 2019. – Т. 104. – С. 93-101.
- Sauvé S, Dumestre A, McBride M, Gillett JW, Berthelin J, Hendershot W (1999) Nitrification potential in field-collected soils contaminated with Pb or Cu. *Appl Soil Ecol* 12(1):29–39.
- Kızılkaya R. et al. Microbiological characteristics of soils contaminated with heavy metals //European Journal of Soil Biology. – 2004. – Т. 40. – №. 2. – С. 95-102.
- Horsley R. W., Roscoe J. V., Talling I. B. Nitrate reduction by *Pseudomonas* spp.: antagonism by fermentative bacteria //Journal of Applied Bacteriology. – 1982. – Т. 52. – №. 1. – С. 57-66.

ПРОТИВОЭРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АГРОПОЧВ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ

ИВАНКОВА А.И.¹, БРИКМАНС А.В.¹, СЕМАЛЬ В.А.^{1, 2}

¹ ФГАОУВО ДВФУ, Владивосток,

² ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, Владивосток

creativewriter1903@gmail.com

Аннотация. Впервые для агропочв юга Приморского края на примере агротемногумусовых подбелов рассматривается влияние внесенного в почву биоугля (биочара), произведенного из древесных остатков березы *Betula alba*, на физические свойства почвы: гранулометрический состав, коэффициент дисперсности по Качинскому (Кд), степень агрегированности по Бэйверу и Радесу (Ка), фактор структурности (Кс) по Вадюниной, противоэрозионная устойчивость по Воронину и Кузнецову (ППС) в зависимости от разных доз внесения биочара (1 кг м^{-2} (10 т га^{-1}) и 3 кг м^{-2} (30 т га^{-1})) и наличия дренажной мелиоративной системы.

Ключевые слова. Биоуголь. Противоэрозионная устойчивость. Физика почв. Гранулометрический состав. Микроагрегатный состав.

Введение

Противоэрозионная устойчивость почв характеризует способность почв противостоять смывающему воздействию водного потока или взаимному воздействию потока воды и капель дождя, величина выражается размывающей скоростью потока, определяется размером водопрочных агрегатов и сцеплением их друг с другом. Противоэрозионная устойчивость в значительной степени определяется свойствами коллоидно-дисперсных минералов, входящих в состав почв и преобладающих непосредственно в илистой фракции частиц (Lehmann, 2007. Atkinson et al., 2010. Hillel, 1998). Внесение биоугля влияет на физические свойства агропочв, оценив их изменения, возможно выявить воздействие биоугля на противоэрозионную устойчивость почв.

Цель исследования – определить противоэрозионную устойчивость агропочв юга Приморского края при внесении биоугля.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – агротемногумусовые подбелы Приморской овощной опытной станции с овощным севооборотом с применением глубокого дренажа (120 см) и без дренажа. С 2018 г. в качестве мелиоранта для улучшения физических и противоэрозионных свойств почв впервые внесли биоуголь, произведенный из древесных остатков березы *Betula alba* (1 и 3 кг м^{-2}) (Попова и др., 2019).

Результаты и обсуждение

Анализ исследуемых образцов агротемногумусовых подбелов в октябре 2018 года по гранулометрическому составу показал, что все почвы являются глиной легкой. Микроагрегатный состав этих же образцов в контроле с дренажем представляет собой средний суглинок. В дренаже с внесением 1 и 3 кг биоугля, в бездренажной системе без биочара и с дозами в 1 и 3 кг , микроагрегатный состав представлен легким суглинком.

В начале вегетационного периода (май) агропочвы как с дренажем, так и без него по гранулометрическому составу в контрольных образцах являлись тяжелым суглинком. В дозе биочара 1 кг м^{-2} грансостав представлен суглинком тяжелым как в дренажной, так и в бездренажной системах. В дозе 3 кг м^{-2} биоугля в дренажной системе грансостав является глиной легкой, в системе без дренажа - суглинком тяжелым.

В микроагрегатном анализе наблюдается низкое содержание частиц $< 0,01 \text{ мм}$ как в системе с дренажем, так и без него, не превышающее 10 %. В конце вегетационного периода (октябрь) для контроля с дренажем гранулометрический состав утяжелился и перешел в глину легкую, в бездренажной системе остался суглинком тяжелым. В дозе биочара 1 кг м^{-2} в дренажной системе произошел переход с суглинка тяжелого до глины легкой, в бездренажной системе остался без изменений. В дозе 3 кг м^{-2} - глиной легкой для дренажной системы и суглинком тяжелым для бездренажной. Таким образом, внесение биоугля способствовало облегчению гранулометрического состава агропочв. Микроагрегатный анализ показал, что к концу вегетационного периода сумма фракций физической глины составила от 20% до 35%, также можно наблюдать увеличение содержания этих частиц при внесении биоугля как в дренажной системе, так и без нее.

Соотношение данных гранулометрического и микроагрегатного составов позволяет судить о потенциальной способности почв к агрегированию, о состоянии плазмы и водоустойчивости почвенных структур (табл.). Процентное отношение содержание ила, полученное при микроагрегатном анализе к его содержанию при гранулометрическом анализе, дает нам фактор дисперсности, который весной показал высокую водопрочность агрегатов, а значит, лучшую их водостойкость. При этом фактор структурности большинства образцов является незначительным, это говорит о том, что агропочвы обладают незначительной способностью к оструктурированию. Степень агрегированности почв в среднем удовлетворительная, встречается весьма слабая и слабая.

Таблица. Оценка качества структуры агротемногумусовых подбелов.

Объект	Коэффициент дисперсности (Качинский, 1958)	Фактор структурности (Качинский, 1958)	Степень агрегированности почв (Качинский, 1958)	Противоэрозионная устойчивость (Качинский, 1958)
	%			
Октябрь 2018				
Др к	29 – слабо водопрочная структура	49 – незначительная способность к оструктурированию	26 – весьма слабая степень агрегированности	1,6 – противоэрозионная устойчивость низкая
Др к 1 кг	29 – слабо водопрочная структура	49 – незначительная способность к оструктурированию	58 – удовлетворительная степень агрегированности	1,6 – противоэрозионная устойчивость низкая
Др к 3 кг	57 – не водопрочная структура	49 – незначительная способность к оструктурированию	54 – удовлетворительная степень агрегированности	0,8 – противоэрозионная устойчивость низкая

**Материалы международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение
в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду»**

ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия 08 декабря 2020 г.

Объект	Коэффициент дисперсности (Качинский, 1958)	Фактор структурности (Качинский, 1958)	Степень агрегированности почв (Качинский, 1958)	Противоэрозионная устойчивость (Качинский, 1958)
	%			
Бдр к	27 – слабо водопрочная структура	56 – незначительная способность к оструктуриванию	54 – удовлетворительная степень агрегированности	2,07 – противоэрозионная устойчивость низкая
Бдр к 1 кг	23 – слабо водопрочная структура	49 – незначительная способность к оструктуриванию	39 – слабая степень агрегированности	2,13 – противоэрозионная устойчивость низкая
Бдр к 3 кг	20 – достаточно водопрочная структура, переходящая в слабо водопрочную	61 – удовлетворительная способность к оструктуриванию	62 – удовлетворительная степень агрегированности	3,05 – противоэрозионная устойчивость средняя
Май 2019				
Др к	10 – водопрочная структура, переходящая в достаточно водопрочную	35 – незначительная способность к оструктуриванию	88 – высокая степень агрегированности	3,5 – противоэрозионная устойчивость средняя
Др к 1 кг	9 – водопрочная структура	39 – незначительная способность к оструктуриванию	86 – высокая степень агрегированности	4,3 – противоэрозионная устойчивость средняя
Др к 3 кг	18 – достаточно водопрочная структура	49 – незначительная способность к оструктуриванию	79 – хорошая степень агрегированности	2,7 – противоэрозионная устойчивость средняя
Бдр к	8 – водопрочная структура	35 – незначительная способность к оструктуриванию	62 – удовлетворительная степень агрегированности	4,3 – противоэрозионная устойчивость средняя
Бдр к 1 кг	8 – водопрочная структура	39 – незначительная способность к оструктуриванию	65 – удовлетворительная степень агрегированности, переходящая в хорошую	4,87 – противоэрозионная устойчивость средняя
Бдр к 3 кг	23 – слабо водопрочная структура	41 – незначительная способность к оструктуриванию	73 – хорошая степень агрегированности	1,78 – противоэрозионная устойчивость низкая
Октябрь 2019				
Др к	17 – достаточно водопрочная структура	43 – незначительная способность к оструктуриванию	65 – удовлетворительная степень агрегированности, переходящая в хорошую	2,52 – противоэрозионная устойчивость средняя
Др к 1 кг	8 – водопрочная структура	47 – незначительная способность к оструктуриванию	71 – хорошая степень агрегированности	5,87 – противоэрозионная устойчивость средняя
Др к 3 кг	14 – достаточно водопрочная структура	45 – незначительная способность к оструктуриванию	70 – хорошая степень агрегированности	3,21 – противоэрозионная устойчивость средняя

Объект	Коэффициент дисперсности (Качинский, 1958)	Фактор структурности (Качинский, 1958)	Степень агрегированности почв (Качинский, 1958)	Противоэрозионная устойчивость (Качинский, 1958)
	%			
Бдр к	10 – водопрочная структура, переходящая в достаточно водопрочную	30 – незначительная способность к оструктуриванию	45 – слабая степень агрегированности	3 – противоэрозионная устойчивость средняя
Бдр к 1 кг	30 - слабо водопрочная структура	33 – незначительная способность к оструктуриванию	55 – удовлетворительная степень агрегированности	1,1 – противоэрозионная устойчивость низкая
Бдр к 3 кг	18 – достаточно водопрочная структура	35 – незначительная способность к оструктуриванию	46 – слабая степень агрегированности	1,94 – противоэрозионная устойчивость низкая

Примечание* Др – дренажная система; Бдр – система без дренажа; к – контроль; 1 кг – внесение 1 кг биочара; 3 кг – внесение 3 кг биочара

Противоэрозионная устойчивость агропочв в октябре 2018 г. преимущественно низкая и колеблется в пределах от 0,8 до 2,13%, в контроле без дренажа и дозой биоугля 3 кг – противоэрозионная устойчивость средняя (3,05%). В начале вегетационного периода (май 2019 г.) показатели противоэрозионной стойкости изменяются и все образцы, кроме контроля без дренажа с 3 кг биочара (показатель снижается и составляет 1,78% – низкая противоэрозионная устойчивость), переходят к показателю средней противоэрозионной стойкости (2,7–4,87%). Это показывает улучшение сопротивляемости почвенных частиц к внешнему воздействию водных потоков и последующему разрушению. Через год (октябрь 2019 г.) после начала ведения эксперимента показатели противоэрозионной устойчивости большинства образцов остались оптимальными и показывали средние значения (2,52–5,87), однако в образцах без дренажа и с внесением различных доз биоугля (1 и 3 кг м⁻²), ухудшались и составляли 1,1–1,94% соответственно, низкая противоэрозионная устойчивость.

Выводы

Было установлено, что применение биоугля в качестве структуратора агропочв положительно влияет на противоэрозионную устойчивость, но только при наличии дренажной системы, параметры значительным образом улучшаются, что способствует появлению способности почв сопротивляться воздействию воды. Дозы биочара 1 и 3 кг/м² оказали положительное воздействие на структуру почв.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05166.

Список литературы

- Lehmann J. (2007) Bio-energy in the black // *Frontiers in ecology and the environment*. №7. 381-387 с.
- Atkinson, C.J., Fitzgerald, J.D., Hipps, N.A. (2010) Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337, 1–18.

- Hillel, D. (1998) Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic Press, Waltham.
- Попова, А. Д. (2019) Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края / А.Д. Попова, В.А. Семаль, А.В. Брикманс, О.В. Нестерова, Ю.А. Колесникова, М.А. Бовсун // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. № 6. - С. 57-63.
- Качинский Н.А. (1958) Механический и микроагрегатный состав почвы. Методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР.

ANTIEROSION PROPERTIES OF AGRICULTURAL SOILS AFTER BIOCHAR APPLICATION

IVANKOVA A.I.¹, BRIKMANS A.V.¹, SEMAL V.A.^{1,2}

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

² Federal Research Center for Biodiversity, Vladivostok, Russia
creativewriter1903@gmail.com

Abstract. For the first time for agricultural soils of the south of the Primorskiy Region (Russia), the influence of bio-charcoal (biochar) applied to soil was studied on Endoargic Anthrosols. The biochar was made from wood residues of birch (*Betula alba*) and obtained by pyrolysis at a temperature of 360-380°C. Different rates of biochar application (1 kg m⁻² (10 t ha⁻¹) and 3 kg m⁻² (30 t ha⁻¹)) in soils with and without drainage systems were studied. The physical properties of the soil: particle-size distribution, dispersion coefficient according to Kachinskiy, aggregation degree according to Baver and Rhoades, structural factor according to Vadyunina, and anti-erosion properties according to Voronin and Kuznetsov were studied.

Keywords: Biochar. Anti-erosion properties. Soil physics. Grain-size distribution. Micro-aggregate distribution.

БИОУГОЛЬ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОСВОЕНИЯ ЗАКУСТАРЕННОЙ ЗАЛЕЖИ

ИВАНОВ А. И.

ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург,
ivanovai2009@yandex.ru

Аннотация В 2016-2020 гг. выполнено исследование по оценке запаса надземной биомассы древесно-кустарниковой растительности (ДКР) на закустаренных сельскохозяйственных угодьях, а также технологических вариантов их освоения, в том числе биоуглевой технологии. Установлено, что запас надземной биомассы ДКР определяется агроэкологическими условиями, её ботаническим составом и возрастом. Он варьирует при возрасте от 5 до 20 лет в пределах от 6–67 т га⁻¹ до 81–255 т га⁻¹, составляя в среднем 132 т га⁻¹. Результаты полевого эксперимента показали, что все виды продуктов переработки ДКР (щепа, сечка, зола и биоуголь) снижают продуктивность однолетних и многолетних трав. Их заделка в почву должна сопровождаться применением традиционных мелиорантов: доломита сыромолотого и птичьего помёта. Применение по их фону 10 т га⁻¹ биоугля оптимизировало комплекс физико-химических, агрофизических и агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы, повысило продуктивность травяного звена севооборота на 24%, содержание в зелёной массе трав сырого протеина – на 11%, снизило уровень накопления нитратов в ней на 19%. Потенциал выбросов углекислого газа при этом снизился с 51–86 до 10,3 т га⁻¹.

Ключевые слова. Древесно-кустарниковая растительность. Дерново-подзолистая почва. Мелиорант. Биоуголь. Агрономическая эффективность.

Введение

Обострение экологических и продовольственных проблем, связанных с глобальными климатическими изменениями, побуждает к поиску технологий, снижающих выброс в атмосферу парниковых газов (Lal, 2000; Major et al., 2010; Smith, 2010). Несмотря на то, что вклад земледелия относительно невелик, его роль в депонировании CO₂ в почве может быть весьма существенной (Курганова и др., 2018; Kudеyаrov, 2019). Отказ от активного использования сельскохозяйственных угодий в Нечернозёмной зоне России привёл к их зарастанию древесно-кустарниковой растительностью на площади более 10 млн. га. С одной стороны, это способствовало депонированию CO₂ в почвах и биомассе ДКР, достигающему в масштабах страны 45 млн. т в год (Kudеyаrov, 2019). С другой стороны, ограничило ресурсную базу развития сельскохозяйственного производства настолько, что только для её сохранения среднегодовые темпы культуртехнической мелиорации должны достигать 300 тыс. га (Иванов, Гулюк, Янко, 2020), а для масштабного решения задач Доктрины продовольственной безопасности – до 1 млн. га. Потенциал выбросов углекислого газа при этом будет сопоставим с масштабами его депонирования в предшествующий период.

В сложившихся обстоятельствах явным преимуществом обладают культуртехнические технологии преобразования биомассы ДКР в биоуголь и его внесения в почву. Однако имеющиеся к настоящему времени данные относительно особенностей состава и свойств, оптимальных дозировок, агрономической и экономической эффективности, экологической безопасности весьма неоднозначны и получены, в большинстве своём, в лабораторных и микрополевых экспериментах (Amonette, Joseph, 2009; Рижия и др., 2014, 2015; Bayan, 2015;

Соколик и др., 2015; Григорян и др., 2016). При этом нельзя сбрасывать со счёта и особенности современных почвенно-климатических условий: скрытую деградацию эффективного плодородия доминирующих в регионе дерново-подзолистых почв (Литвинович, Иванов, Янко, 2019; Иванов и др., 2019), его высокую пространственную неоднородность (Литвинович, 2007; Иванов и др., 2014) и обострение рисков погодно-климатических аномалий (Усков, Усков, 2014; Иванов, Конашенков, 2018).

В 2015-2019 гг. выполнено комплексное исследование по оценке запасов надземной биомассы ДКР в различных почвенно-экологических условиях Северо-Запада РФ и эффективности заделки в почву продуктов её переработки при освоении закустаренной залежи.

Объекты и методы исследования

Методологически исследование опиралось на геоботаническое обследование и полевое экспериментирование. Ботанический состав и запас надземной биомассы ДКР определялся на зарастающих ДКР сельскохозяйственных угодьях в пределах моренных, озерно- и водноледниковых равнин Псковской и Ленинградской областей в типичных агроэкологических условиях. Таковыми были выбраны почвы тяжёлого и лёгкого гранулометрического состава, а также автоморфные и полугидроморфные условия увлажнения. Вторым оценочным фактором здесь выступали доминирующие виды ДКР, третьим – возраст залежи и ДКР. Обследование выполнено методом закладки в единообразных геоморфологических условиях в четырехкратной повторности ключевых участков площадью 100 м². На них определялся ботанический состав и запас надземной растительной биомассы ДКР сплошным весовым методом.

Полевой стационарный опыт в системе полевого севооборота «однолетние травы + многолетние травы – многолетние травы 1 г.п. – многолетние травы 2 г.п. – многолетние травы 3 г.п. – озимые зерновые – яровые зерновые» был заложен в ООО «София» Тосненского района Ленинградской области в пределах Тосненской низины. Схема опыта двухфакторная. Фактор А – продукт переработки ДКР, соответствующий технологии освоения закустаренной залежи: контроль (без ДКР) – технология корчевки и удаления ДКР в бурты; щепа ДКР – технология сведения ДКР и заделки в почву фрезами; сечка ДКР – технология сведения ДКР и заделки в почву мульчерными фрезами; биоуголь – технология корчевки и преобразования ДКР в биоуголь; зола – технология корчевки и последовательного преобразования в евродрова и золу. Все продукты ДКР были получены из 100 т га⁻¹ надземной биомассы. Фактор Б – комплекс мелиорантов (КМ) (доломит сыромолотый (ДСМ) – 10 т га⁻¹; птичий помёт (ПП) – 20-40 т га⁻¹; калий хлористый – К70-140): контроль – без КМ; КМ1; КМ2; КМ3; КМ4. В КМ1 и КМ3 доза помёта составляла 20 т га⁻¹ по сухому веществу и К70, а в КМ2 и КМ4 – 40 т га⁻¹ и К140. В КМ1 и КМ2 доза ДСМ вносилась послойно: ½ - под вспашку и ½ - под культивацию, а в КМ3 и КМ4 – глубоко под вспашку.

Почва опыта дерново-подзолистая глееватая тяжелосуглинистая. На момент закладки обладала pH_{KCl} – 4,27 и содержала 3,87 % органического вещества, 54 мг кг⁻¹ подвижного фосфора и 123 мг кг⁻¹ подвижного калия. В качестве однолетних трав в опыте возделывался овёс, многолетних трав – смесь клевера лугового, фестулолиума и тимофеевки луговой. Опыт модельно-полевой с систематическим размещением делянок в 3-кратной повторности. Учётная площадь одной делянки 1,5 м². Учеты проведены сплошным весовым методом, статистическая обработка основных результатов – дисперсионным методом с использованием программного комплекса Stat.

Результаты и обсуждение

Результаты геоботанического обследования показали все изученные при этом факторы (ботанический состав, возраст, почвенно-экологические условия) оказывали выраженное влияние на запас надземной биомассы ДКР. Так в среднем по изученным вариантам запас ДКР на тяжелых почвах (135 т га^{-1}) оказался в два раза выше, чем на легких (68 т га^{-1}) по гранулометрическому составу, а в полугидроморфных условиях увлажнения (117 т га^{-1}) – в 1,8 раза выше, чем в автоморфных (65 т га^{-1}). Средний запас надземной биомассы ДКР к возрасту зарастания в 5, 10, 15 и 20 лет составил: 27, 80, 113 и 165 т га^{-1} соответственно. При оценке влияния фактора доминирования одного из ботанических видов сформировался убывающий ряд: ольха серая и берёза бородавчатая – 114 т га^{-1} > осина обыкновенная – 110 т га^{-1} > виды ивы (преимущественно, козья) – 89 т га^{-1} > хвойные (сосна и ель обыкновенные) – 55 т га^{-1} .

Средний запас надземной биомассы с учётом фактического доминирования на сельскохозяйственных угодьях более возрастных древесно-кустарниковых зарастаний на момент завершения обследования в 2017 г. оценивался нами в 132 т га^{-1} . С учётом установленных динамических характеристик прироста надземной биомассы ДКР в настоящее время эта величина в среднем по Нечерноземью составляет не менее 160 т га^{-1} .

Таким образом, абсолютный потенциал выбросов углекислого газа в случае дровяного сжигания надземной биомассы ДКР при освоении закустаренной залежи варьирует в пределах $25\text{--}153 \text{ т га}^{-1}$, составляя в среднем около 78 т га^{-1} . С учетом достигнутых фактических показателей состава биоугля, его производство в полевом эксперименте позволило снизить параметры потенциальных выбросов CO_2 с $51\text{--}86$ до 10 т га^{-1} (в 5,1-8,6 раза).

Однако, его высокая агрономическая эффективность как мелиоранта почвы при фактическом внесении в дозе 10 т га^{-1} на сильноокислой тяжёлой дерново-подзолистой почве проявилась только на фоне традиционных мелиорантов (рис. 1).

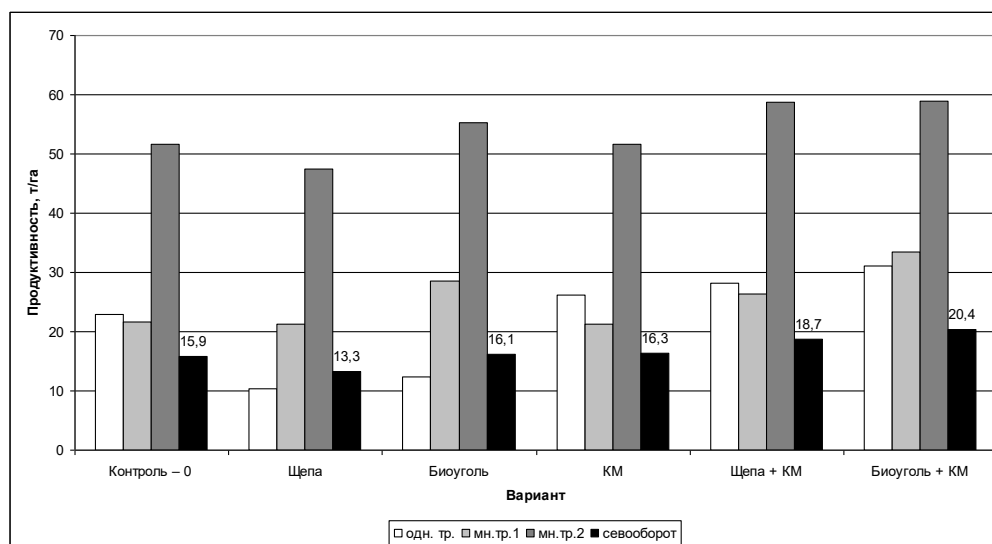


Рис. 1. Влияние продуктов ДКР и комплекса мелиорантов (КМ) на продуктивность культур и звена севооборота (з.ед.) НСР₀₅: одн. тр. – 3,3, мн. тр.1 – 5,7, мн. тр.2 – 7,0, севооборот – 0,9 т га^{-1}

В первый год освоения все продукты переработки ДКР по разным причинам вызвали снижение урожайности зелёной массы однолетних трав на 42-80%. Не стал исключением и конкурирующий с растениями за минеральные компоненты почвенного раствора биоуголь (-42%). Однако в условиях неблагоприятной дождливой погоды и запашки в почву мощной

дернины необычно низкой эффективностью отметили и комплекс традиционных мелиорантов. Снижению отдачи от него в последующем способствовало отрицательное влияние азотного компонента помёта на развитие клевера лугового весьма неприхотливого к почве сорта «Орфей».

На фоне продуктов переработки ДКР эффективность КМ заметно возрастала. Урожайность однолетних трав увеличилась на 23–36% относительно варианта корчевки и в 2,7 и 2,5 раза – относительно вариантов с применением щепы и биоугля. И если щепа негативно влияла и на развитие многолетних трав, то биоуголь за счёт некоторого улучшения кислотно-основных свойств почвы повышал их продуктивность на 31% в первый и на 7% – во второй год хозяйственного использования. В результате по фону КМ биоуглевая технология позволила повысить продуктивность звена севооборота на 28% и добиться максимальной его продуктивности.

По влиянию на кислотно-основные свойства почвы биоуголь несколько уступал золе. Под действием 10 т/га биоугля обменная кислотность снизилась на 5%, содержание подвижного алюминия – на 26 %. За счёт улучшения условий для развития клевера лугового он обеспечил увеличение содержания и органического вещества, и легкогидролизуемого азота на 13 %. Но, усилив поглощение урожаем питательных веществ он способствовал снижению содержания подвижных фосфатов и калия в почве на 31-32%. Ситуацию радикально менял комплекс мелиорантов. Их совместное действие приобретало аддитивный характер. В результате содержание органического вещества в пределах пахотного слоя увеличилось с 3,76 до 5,46 % (на 45%), легкогидролизуемого азота – с 64 до 88 мг кг⁻¹ (на 38 %), подвижного азота – с 31 до 45 мг кг⁻¹ (на 45 %), подвижного фосфора – с 57 до 162 мг кг⁻¹ (на 182%). Оптимизировался весь комплекс кислотно-основных свойств почвы: рН_{KCl} увеличился с 4,25 до 5,68 (на 34%), сумма обменных оснований – с 6,36 до 12,18 смоль кг⁻¹ (на 92 %), степень насыщенности основаниями – на 60 %, снизились: гидролитическая кислотность – с 5,97 до 2,60 смоль кг⁻¹ (на 56%) и содержание подвижного алюминия – с 0,34 до 0,11 смоль кг⁻¹ (на 68%).

В отличие от заделанной в почву измельчённой ДКР, снизившей содержание в зелёной массе трав сырого протеина на 6%, сырой золы – на 16%, биоуголь в сочетании с КМ позволил повысить её обеспеченность простыми сахарами, сырым протеином, зольными веществами, каротином на 9-28% (отн.). При этом сократилось содержание сырой клетчатки на 11%, а нитратов – на 12% к контролю. Относительно варианта с КМ уровень накопления нитратов снизился на 19%.

Среди всех технологий сведения и переработки ДКР переработка в биоуголь оказалась самой дорогостоящей – 109-114 тыс. руб га⁻¹. Однако и при этом срок её окупаемости в зависимости от хозяйственно-экономических условий варьировал от 1 до 3,5 лет при рентабельности за 3 года до 143%.

Выводы

Подвергшиеся зарастанию древесно-кустарниковой растительностью сельскохозяйственные угодья в Нечернозёмной зоне России занимают более 10 млн. га, а запас надземной биомассы ДКР на них в период 2017-2020 гг. составлял в среднем 132-160 т га⁻¹. Потенциал выбросов углекислого газа при сельскохозяйственном освоении таких земель варьирует в пределах 25-153 т га⁻¹, составляя в среднем около 78 т га⁻¹. Снизить его в 5,1-8,6 раза позволяет биоуглевая технология преобразования биомассы ДКР. Однако высокоэффективное применение биоугля на деградированных почвах требует обязательного применения высоких доз традиционных мелиорантов (сромолотого доломита и дополненного калийным удобрением

птичьего помёта), что позволяет наряду с ограничением выбросов CO₂ добиться повышения эффективного плодородия почвы, продуктивности однолетних и многолетних трав и улучшения наиболее важных показателей качества зелёной массы трав. За счёт этого обеспечивается рентабельность освоения залежи до 143%.

Список литературы

- Григорян Б.Р., Грачёв А.Н., Рязанов С.С. Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 11. С. 185-189.
- Иванов А.И., Вязовский А.А., Конашенков А.А., Петров И.И., Воробьёв В.А. Актуальные вопросы известкования кислых почв Нечерноземья // Агрохимический вестник. 2019. №6. С. 3-6.
- Иванов А.И., Гулюк Г.Г., Янко Ю.Г. Актуальные вопросы развития мелиорации в Нечерноземье // Мелиорация и водное хозяйство. 2020. № 3. С. 5-13.
- Иванов А.И., Конашенков А.А. Снижение зависимости земледелия Северо-Запада России от погодно-климатических аномалий: проблемы и решения // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 5. С. 32-37.
- Иванов А.И., Конашенков А.А., Хомяков Ю.В., Фоменко Т.Г., Федькин И.А. Оценка параметров пространственной неоднородности показателей почвенного плодородия // Агрохимия. 2014. № 2. С. 39-49.
- Иванов А.И., Янко Ю.Г. Мелиорация как необходимое средство развития земледелия Нечерноземной зоны России // Агрофизика. 2019. № 1. С. 67-78.
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мостовая А.С., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Личко В.И., Баева Ю.И. Влияние процессов естественного лесовосстановления на микробиологическую активность постагрогенных почв Европейской части России // Лесоведение. 2018. № 1. С. 3-23.
- Литвинович А.В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89-94.
- Литвинович А.В. Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв Нечернозёмной зоны // Агрохимия. 2009. № 7. С. 85-93.
- 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. № 2. 2015. С. 211-220.
- Рижия Е.Я., Мухина И.М., Павлик С.В., Балашов Е.В. Применение биоугля в сельском хозяйстве Российской Федерации (методические рекомендации). СПб.: Изд. АФИ, 2014. 28 с.
- Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Иванова Т.Г., Попеня М.В., Войникова Е.В. Характеристика дерново-подзолистых почв после внесения биоугля // Весці НАН Беларусі. 2015. № 2. – С. 87-94.
- Усков И.Б., Усков А.О. Основы адаптации земледелия к изменениям климата. СПб.: Нестор-История, 2014. 284 с.
- Amonette J.E., Joseph S. Biochar for Environmental Management. London: 2009. P. 33-53.
- Bayan M.R. Use of biochar in sustainable food production and effects on Missouri Soil // LUCER – MC Report. № 11. 2014. 20 p.
- Kudeyarov V.N. Soil-biogeochemical Aspects of arable Farming in the Russian Federation // Eurasian Soil Science. 2019. T.52. № 1. P. 94-104.
- Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // Science. 2000. V. 304. P. 1623-1627.
- Major J., Lehmann J., Rondon M. and Goodale C. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, and soil respiration // Glob. Chang. Biol. 2010. V.16. - P. 1366-1379.
- Smith J.L. The effect of young biochar on soil respiration // Soil Biology & biochemistry. 2010. V. 42. P. 2345-2347.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В РФ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОУГЛЯ

КОСТЕЦКИЙ Д.М., РИЖИЯ Е.Я

ФГБОУ ВО «РГГМУ», Санкт-Петербург

dan-kost@mail.ru

Аннотация. По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзора) проведен анализ по формированию отходов производства и потребления за 2015-2019 годы в Российской Федерации. Установлено, что в секторах экономики, где формируются органические отходы, и которые потенциально могут быть использованы для производства биоугля, не используется до 15-20% отходов сельского и лесного хозяйства, до 50% отходов пищевой и перерабатывающей пищевой промышленности и 20-30% отходов деревообрабатывающей промышленности.

Ключевые слова. Биоуголь. Органические отходы.

Введение

Идея использования биоугля, как продукта карбонизации разных органических материалов, с целью улучшения качества почв, приобрела популярность с начала 2000-х годов. К тому времени были изучены некоторые сельскохозяйственные почвы Латинской Америки с большим количеством древесного угля в профиле, получивших название Терра Прета (черная земля индейцев), отличавшихся от окружающих естественных почв высоким плодородием (Glaser et al., 2002; Lehman et al., 2006). Начался бум биотехнологий по производству биоугля на основе пиролиза органических материалов (высокотемпературной обработки в бескислородной среде). Однако оказалось, что высокоароматичные карбонизированные материалы, произведенные в разных технологических условиях и из разной органики (температура от 400 до 700°C, бескислородная или слабокислородная среда, быстрый или медленный пиролиз), различались по физико-механическому составу, пористости, плотности сложения, прочности, гигроскопичности и влагопоглощению, элементному составу, зольности и кислотности (Sohi et al., 2009; Woolf et al., 2010). Поэтому первое десятилетие ученые всего мира изучали возможность применения различных биоуглей (из отходов деревообрабатывающей промышленности, растительных остатков, шелухи или скорлупы различных орехов, навоза и водорослей) на всевозможных сельскохозяйственных почвах. В целом, не смотря на разнообразие биоуглей, был установлен ряд положительных свойств внесенного продукта в почвы, в частности на физические свойства (плотность и пористость, структуру и водно-воздушный режим), микробиологическую активность и урожайность культур (Liang et al., 2006; Chan et al., 2007). Обладая нейтральной или щелочной реакцией, биоугли снижали кислотность почв (Lehman et al., 2003; Luo et al., 2013). Значительное количество исследований доказало снижение эмиссии парниковых газов из почв с биоуглем (Рижия и др., 2015; Amelot et al., 2013; Zwieten et al., 2009). Но низкое содержание питательных элементов (NPK) и стабильная ароматическая форма углерода не позволили перевести данный продукт в разряд органических удобрений, и на втором десятке изучения биоугля стало активно развиваться направление по совместному использованию продуктов пиролизной карбонизации с минеральными удобрениями, либо органическими компостами (Schulz, Glaser, 2012).

В настоящее время биоуголь широко используется в сельском хозяйстве разных стран мира в качестве органического мелиоранта, главным образом решая вопросы повышения плодородия почв, утилизации неиспользованных органических отходов, снижения эмиссии парниковых газов. Однако в России данный продукт остается на стадии исследуемого объекта, продолжается изучение его влияния на свойства той или иной почвы в различных дозах и фракциях. И если в Европейских странах для производства биоугля чаще всего используются отходы аграрной отрасли, то в России – древесная продукция, т.к. производство древесного угля пиролизным способом было налажено еще в советское время, но с предназначением использования в энергетике, металлургии, химической промышленности и медицине. И, несмотря на то что в нашей стране существует огромное количество компаний по производству и реализации мини-установок по производству данного продукта, аграрный сектор остается не заинтересованным в использовании данного продукта.

Главные опасения связаны с невозможностью выхода на промышленные уровни производства биоугля и риском отсутствия органических отходов для его производства. Поэтому целью данного исследования явился анализ образования органических отходов в Российской Федерации для возможного производства биоугля. Задача исследования – описательный количественный анализ данных Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) по формированию отходов производства и потребления за 2015-2019 годы в Российской Федерации.

Результаты и обсуждение

Проблема отходов производства и потребления является одной из важнейших проблем, стоящей перед современным человеком. Жизнедеятельность человека, животных, любая технологическая деятельность неизбежно приводят к образованию различных видов отходов, оказывающих определенное воздействие на окружающую среду. Согласно Федеральному закону от 24.06.1998 N 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» под отходами понимаются вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления. Под утилизацией понимается - использование отходов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг, включая повторное применение отходов по прямому назначению (рециклинг), их возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки (регенерация), извлечение полезных компонентов для их повторного применения (рекуперация).

Исходя из данных Росприроднадзора в Российской Федерации за 2019 год, было произведено отходов производства и потребления в количестве 7750,9 млн. (из них 100.6 млн. (1.3%) было отнесено к категории опасных). 3800,8 млн. т (50.1 %) было утилизировано и обезврежено или размещено на объектах, принадлежащих предприятиям (Росстат, 2020).

Из данной общей категории отходов было уделено внимание тем, которые имеют органическое происхождение, и которые потенциально могут быть использованы для производства биоугля, а именно: отходам сельского и лесного хозяйства, пищевых продуктов и напитков (пищевой промышленности и переработки пищевых продуктов), отходам вторичной переработки древесины и изделий из дерева. На рисунке 1 представлено процентное соотношение основных отходов органического природного происхождения по усредненным данным 2015-2019 годов.

До 60% отходов данной категории приходится на отходы сельского и лесного хозяйства. Первые подразделяются на отходы растениеводства и животноводства, у каждой из этих

отраслей имеются свои особенности, отражающиеся в видах образующихся отходов. На общее количество образующихся отходов растениеводства влияет урожайность или не урожайность выращиваемых культур, соответственно ежегодно образуются различные объёмы отходов. Отходы животноводства в больших количествах могут загрязнять воздух веществами, вредно воздействующими на человека, растения и животных. Особенно остро эта проблема стоит там, где значительное количество отходов не утилизируется, в результате этого в окружающую среду попадают неприятные запахи. В лесном хозяйстве отходы образуются в результате лесозаготовок, лесопиления и деревообработки. Практически все отходы данной категории являются ценным сырьем для производства различной продукции, но по возможности утилизации они не равноценны.



Рис. 1. – Доля основных отходов органического природного происхождения, среднее за 2015-2019 годы.

Следует обратить внимание, что мелкие сыпучие отходы лесозаготовки и лесопиления, такие как хвоя, опилки, стружка, ветки, корневая часть, зеленая масса, все ещё широко не используются по причине их технической и экономической недоступности. Затраты на сбор, обработку и транспортировку данного сырья во многих случаях превышают стоимость готовой продукции.

Анализ статистических данных за последние 5 лет показал, что количество отходов сельского и лесного хозяйства варьирует в пределах 45,8–49,2 млн. т год⁻¹. Процентная доля утилизации данных отходов составляет до 78–85%, а 15–20% отходов вообще не используется в связи с невозможностью или нецелесообразностью утилизировать (например, кожура, лузга, шелуха, скорлупа, жмых, початки, косточки плодовых фруктов, стеблевая масса и т.д.). Однако с внедрением прогрессивных технологических процессов данные отходы могут менять свою общественную полезность и могут стать сырьем для получения качественно продукции биоугля. Кроме того, согласно экспертным оценкам, основанным на информации о состоянии агропромышленного комплекса Российской Федерации, реальные объемы ежегодно образующихся отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности превышают данные Росприроднадзора об их количестве в 4–5 раз.

Следующей по количеству отходов является пищевая и перерабатывающая промышленность (29%). К отходам данной категории относятся твердые и жидкие остатки пищи человека, а также отходы кухонь и пекарен. Состав их меняется в зависимости от источника: отходы фруктов и овощей, картофельная пульпа, боенские отходы (каныга, мездра), кости

скелета животных и рыб, спиртовая барда, пивная дробина, просроченные пищевые продукты и многие другие отходы различных пищевых производств. За последние пять лет в образовании отходов пищевой промышленности варьировало в пределах 19.5 до 30 млн. т в год, притом, что ежегодное количество утилизированных отходов данной категории составляло меньше 50% - около 10.8 млн. т год⁻¹.

На деревообрабатывающую промышленность (7 %) и производство бумаги и бумажные изделия (7 %) приходятся примерно одинаковые процентные доли. Анализ последних пяти лет показал, что в настоящее время, в связи с применением ресурсосберегающих технологий происходит спад образования отходов целлюлозно-бумажного производства. В 2015 году их количество составляло 6,8 млн. т в год, тогда как в 2019-м году уже 5,5 млн. т. Одновременно, увеличился процент ежегодного количества утилизации данной категории отходов с 92.6% в 2015 году до 100% в 2019 году. Это единственная категория, где наблюдается почти 100 % утилизация отходов. В тоже время для деревообрабатывающей промышленности по окончании реализации производства характерно образование от 17 до 29 % отходов сырья, которое не используется. Древесные отходы можно классифицировать по видам и этапам обработки древесины. По видам все отходы делятся на твердые (горбыли, рейки, обрезки, ветви и т.д.) и мягкие (стружки, опилки и т.д.). По этапам обработки древесины отходы делятся на отходы, связанные с заготовкой леса, отходы первичной обработки древесины в лесопилении, фанерном производстве, отходы вторичной обработки в мебельных производствах. Исходя из анализа данных было установлено, что за последние 5 лет происходило увеличение образования отходов деревообрабатывающей промышленности с 4,5 до 5.9 млн. т в год, в то же время ежегодное количество утилизированных отходов возрастало, от 3.7 до 4.2 млн. т, что связано с общим ростом образования отходов, так как в процентном соотношении доля утилизированных отходов ежегодно снижалась - с 82.2% в 2015 году, до 71.2 % в 2019 году.

Заключение

Таким образом, проблема отходов, в том числе рассмотренных органических отходов в стране в целом решается, но остается существенный процент неиспользованных отходов, негативно влияющих на окружающую среду, которые потенциально могут использоваться в качестве сырья для производства биоугля.

Установлено, что вообще не используется до 15-20% отходов сельского и лесного хозяйства, до 50% отходов пищевой и перерабатывающей пищевой промышленности и 20-30 % отходов деревообрабатывающей промышленности. Согласно Мандату Биоугля, данные категории отходов содержат больше 10% органического углерода и могут служить сырьем для производства карбонизированных материалов для дальнейшей секвестрации углерода в почвах и улучшения показателей ее плодородия.

К сожалению, в настоящее время каждый из параметров сложившейся системы обращения с отходами рассматривается отдельно, в отрыве, не связано с другими. Системный подход к данной проблеме позволил бы реализовать различные программы по увеличению малоотходных производств, по развитию биотехнологий.

Список литературы

- Рижиа Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В. 2015. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент). Почвоведение. 2015. №2. С. 211-220.
Федеральная служба государственной статистики. Электронный ресурс: <https://rosstat.gov.ru/>

Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. Электронный ресурс:
<https://rpn.gov.ru/regions/>

- Ameloot N., DeNeve S., Jegajeevagan K., et al. Short-term CO₂ and N₂O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils. *Soil Biology & Biochemistry*. 2013. 57: 401-410.
- Glaser B., Lehmann J., Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and fertility of soils*. 2002. 35: 219–230.
- Buchkina N.P., E.V. Balashov, E.Y. Rizhiya and K.A. Smith. (2010) Nitrous oxide emissions from a light-textured arable soil of North-Western Russia: effects of crops, fertilizers, manures and climate parameters // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. Vol. 87, 3: 429-442.
- Chan K.Y., Zwieten Van L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic Values of Greenwaste Biochar as a Soil Amendment. *Aust J Soil Res*. 2007. 45: 629-634.
- Lehmann J., Silva J.P., Steiner C., Nehls T., Zech W. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil*. 2003. 249: 343-357
- Lehmann J., Gaunt J., Rondon M. Biochar Sequestration in Terrestrial Ecosystems - A Review. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang* 2006. 11: 403-427.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci Soc Am J*. 2006. 70: 1719-1730.
- Luo Y., Durenkamp M., DeNobili M. Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350°C or 700°C, in a silty-clay loam soil of high and low pH. *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. 57: 513-523.
- 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
- Sohi S., Lopez-Capel E., Krull E., Bol R. Biochar, Climate Change and Soil: A Review to Guide Future Research, in *CSIRO Land and Water Science Report 05/09*, CSIRO, Black Mountain ACT, Australia, 2009. pp. 17-31.
- Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J/ Sustainable Biochar to Mitigate Global Climate Change, *Nature*. 2010 1: 1-9.
- Zwieten L., Singh B., Joseph S., Kimber S., Cowie A. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil. In *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Eds: J. Lehmann, S. Joseph), Earthscan, London, 2009. pp. 227-249.

POSSIBILITIES OF USING ORGANIC WASTE IN THE RUSSIAN FEDERATION FOR PRODUCTION OF BIOCHAR

KOSTETSKIY D. M., RIZHIYA E. Y.

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

dan-kost@mail.ru

Abstract. An analysis on the production and consumption of waste in 2015-2019 in the Russian Federation was carried out based on the data of Federal State Statistics Service and the Federal Service for Supervision of Environmental Management. It was established that up to 15-20% of agricultural and forestry waste, up to 50% of waste from the food and food processing industry, and 20-30% of wood processing industry waste were not used in those sectors of the economy where the organic waste was formed. These waists can potentially be used for biochar production.

Keywords. Biochar. Organic waste.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ БИОЧАРА ДЛЯ ИНАКТИВАЦИИ МЕДИ В ЛУГОВОЙ ПОЧВЕ

ЛОБЗЕНКО И.П.¹, БАУЭР Т.В.², БУРАЧЕВСКАЯ М.В.¹ МАНДЖИЕВА С.С.¹, СУШКОВА С.С.¹,
МИНКИНА Т.М.¹

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

² Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр Российской Академии наук», Ростов-на-Дону, Россия
bkmzyoyo@gmail.com

Аннотация. В ходе исследования был получен биочар с оптимальными характеристиками пористой структуры. Проведена оценка эффективности биочара для инактивации меди в луговой тяжелосуглинистой почве в условиях моделируемого загрязнения с применением фито-теста. Установлена оптимальная доза сорбента для уменьшения подвижности металла в исследуемой почве.

Ключевые слова. Тяжелые металлы. Биочар. Фитотоксичность. ремедиация почв. Морфометрические показатели. Сорбционные характеристики.

Введение

Серьёзную угрозу состоянию природных экосистем в настоящее время представляют тяжёлые металлы (ТМ). Особым отличием ТМ от органических поллютантов является то, что они не подвержены микробиологической или химической деградации и накапливаются в почве в течение длительного времени. Попадая из почвы в растения, ТМ также попадают в организм человека, вызывая серьёзные нарушения здоровья (Копчик, 2014).

Наиболее эффективной представляется сорбционная ремедиация химически загрязнённых почв. Применение данной технологии не наносит существенного вреда экосистеме, за счёт сокращения механического и химического воздействия мелиоративных мероприятий на почву. Также отмечена экономическая эффективность данного способа восстановления почв (Копчик и др., 2016). В качестве сорбента часто применяют биочар. Получение биочара происходит преимущественно путём пиролиза отходов растениеводства или лесной промышленности. Данный сорбент, согласно многим исследованиям, характеризуется большими значениями удельной поверхности и пористости, а также выступает в качестве субстрата для многих микроорганизмов (Григорьян и др., 2016; Joseph et al., 2009; Gorovtsov et al., 2019). Отмечено, что характеристики получаемого биочара сильно зависят от сырья, использованного для его производства, однако вне зависимости от сырья биочар остаётся химически инертным (Kishimoto, Shugiura, 1985; Mukhin et al., 2017).

Одним из преимуществ биочара является возможность его изготовления из региональных отходов растениеводства. Для Ростовской области таким отходом является шелуха подсолнечника. Она плохо подвергается переработке и вторичному использованию, вследствие чего накапливается в больших объёмах. Также, шелуха подсолнечника не содержит токсических веществ, что делает её хорошим сырьём для производства биочара.

Для оценки эффективности действия сорбентов на загрязнённых почвах используют метод фитотестирования. Основным методом определения фитотоксичности почв является лабораторный метод, так как он является экспрессным, дешёвым и сравнительно простым в исполнении. Данный метод используется многими зарубежными и отечественными исследователями (Аниськина, 2006; Блинова, 2014; Joseph et al., 2009; Gorovtsov et al., 2019). Целью данного исследования являлось изготовление биочара с оптимальными

характеристиками пористой структуры и применение его для ремедиации химически загрязнённой почвы.

Материалы и методы

Изготовление биочара производилось из шелухи подсолнечника путём пиролиза. Для этого 100 г. сырья засыпали в толстостенный сосуд из нержавеющей стали с герметичной крышкой (реторту). Реторту помещали в лабораторную муфельную печь. Далее путём варьирования конечной температуры от 500°C до 900°C и времени обработки от 10 до 30 минут было получено несколько образцов биоугля. Определение удельной площади поверхности и пористости образцов было выполнено на волюметрическом анализаторе ASAP 2020 Micromeritics по методу низкотемпературной адсорбции азота. Расчёт параметров пористости и поверхности осуществлялся методом БЭТ по N₂ в диапазоне равновесных значений $P/P_0 = 0,05-0,33$.

Для оценки эффективности полученных сорбентов был заложен модельный эксперимент с искусственным загрязнением почвы медью. Исследуемая почва – луговая карбонатная мощная тяжелосуглинистая среднегумусированная на аллювиальных суглинках, отобранная в центральной части луга на высокой пойме на левом берегу р. Северский Донец Каменск-Шахтинского района Ростовской области. В качестве тест-культуры был выбран редис (*Raphanus sativus radicola*). Данное однолетнее овощное растение характеризуется очень высокой чувствительностью к загрязнению почвы. Помимо этого, семена редиса быстро прорастают с почти стопроцентной всхожестью, которая заметно уменьшается в присутствии поллютантов. У побегов редиса наблюдаются существенные морфологические изменения под действием загрязнителей.

В пластиковые контейнеры объёмом 100 мл поместили по 100 г анализируемой почвы, прошедшей общую подготовку. Затем вносили ацетат меди (II), в концентрации 300 мг кг⁻¹ в пересчёте на чистый Cu. Раствор вносили в количестве, равном 60 % от полевой влагоёмкости. Далее в течение всего эксперимента влажность поддерживалась на том же уровне дистиллированной водой. Через месяц после добавления металлов в соответствии со схемой опыта были внесены сорбенты в дозах 0,5%, 1%, 2,5% и 5% (табл. 1)

Таблица 1. Схема опыта.

Контроль
Загрязнение Cu 300 мг кг ⁻¹
Загрязнение + Биочар 0,5 %
Загрязнение + Биочар 1 %
Загрязнение + Биочар 2,5 %
Загрязнение + Биочар 5 %

Ещё через месяц в контейнеры с почвой высевались семена редиса в количестве 10 шт. на один контейнер. Повторность опыта трёхкратная. Через 7 дней были измерены длины корней и побегов тест-растения. Статистическая обработка данных велась с использованием программ STATISTICA 2010 и Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Для биочара, изготовленного при 500 °С, рассчитанные величины удельной площади поверхности имеют низкие значения на всём диапазоне времени обработки на конечной температуре: от 5,04 м² г⁻¹ до 40,03 м² г⁻¹ (табл. 2). При увеличении конечной температуры обработки до 700 °С происходил также значительный рост удельной площади поверхности. При этом с увеличением времени обработки росло и значение удельной площади поверхности: от

660,28 м² г⁻¹ при 10 минутах до 1919,83 м² г⁻¹ при 30 минутах. Однако при увеличении конечной температуры обработки до 900 °С происходит нарушение структуры биочара: разрывы поверхности на отдельные микроблоки, увеличение размера пор до 38 Å. Данные изменения ухудшают сорбционные характеристики получаемых углей. Выполненный анализ структурных характеристик позволяет установить, что оптимальными условиями для создания сорбента с оптимальным балансом микро- и мезопор и высокой удельной площадью поверхности является ступенчатый нагрев до конечной температуры до 700 °С в диапазоне времени выдержки 10-30 мин. (табл. 2). Пиролиз при 900 °С представляется менее экономичным, к тому же увеличение температуры ведёт к разрушению структуры сорбента.

Таблица 2. Схема опыта

Конечная температура обработки, °С	Время выдерживания, мин.	S _{ВЕТ} , м ² г ⁻¹	V _Σ , см ³ г ⁻¹	V _{микро} , см ³ г ⁻¹	V _{мезо} , см ³ г ⁻¹	D _{pores} , Å
500	10	5,04	0,47	0,04	0,35	14,5
	20	24,35	0,65	0,1	0,43	17,6
	30	40,03	0,72	0,18	0,49	20,9
700	10	660,28	1,06	0,24	0,68	21,6
	20	1367,74	2,08	0,38	1,46	25,4
	30	1919,83	2,45	0,5	1,65	26,7
900	10	1678,29	1,71	0,34	0,93	28,3
	20	1078,02	1,34	0,17	0,54	31,5
	30	965,22	1,01	0,06	0,42	37,9

Рост корневой системы – один из наиболее наглядных признаков, показывающих токсическое действие металла, так как корневая система является первым барьером на пути транслокации металлов из почвы (Ильин, Степанова, 1982). Загрязнение почвы медью в дозе 300 мг кг⁻¹ оказало токсический эффект на рост *Raphanus sativus radicola*: длина корневой системы сократилась на 57%, а побегов – на 59 % по сравнению с контрольным образцом (рис.).

Внесение биочара в различных дозах оказало влияние на длину корней и побегов. Так, при применении дозы 1% длина корней увеличилась 11 %, а побегов – на 48 %. С увеличением дозы сорбента увеличиваются также и морфометрические показатели анализируемого растения: при дозе сорбента 2,5 % длины корней и побегов увеличились на 19 % и 52 % соответственно. При этом увеличение дозы сорбента до 5 % оказало похожий эффект. Однако, для применения данного сорбента для ремедиации почв с экономической точки зрения достаточно применение дозы 1%.

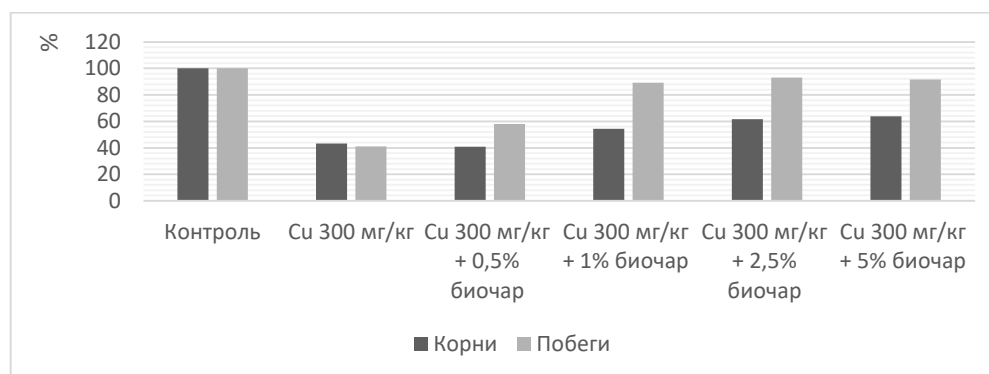


Рис. Влияние различных доз биочара на длину корней и побегов *Raphanus sativus radicola* при дозе загрязнения 300 мг кг⁻¹ Cu, % от контроля

Заключение

Таким образом, была разработана технология получения углеродистого сорбента из шелухи подсолнечника для восстановления луговой почвы, загрязнённой медью. Экспериментально установлено и подтверждено, что наиболее оптимальными условиями для получения сорбента является ступенчатый нагрев до 700 °С и время конечной обработки от 10 мин. до 30 мин. Увеличение температуры приводило к ухудшению структуры сорбента за счёт её частичного разрушения.

С помощью фитотестирования была проанализирована эффективность внесения полученного биочара в луговую тяжелосуглинистую почву. Несмотря на высокую буферность исследуемой почвы, искусственное загрязнение её медью негативно сказалось на развитии редиса. Внесение биочара способствовало улучшению условий роста тест-растения. Установлено, что наиболее оптимальной дозой применения биочара является доза 1%.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-34-60041 и гранта Президента РФ № МК-2244.2020.5

Список литературы

- Аниськина М.В. Мутагенный и токсический эффекты у растений *Tradescantia* (clon 02) и *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh., индуцированные нефтью и нефтепродуктами автореф... дис. кан. наук. Сыктывкар, 2006. 24 с.
- Ильин В.Б., Степанова М.Д. Тяжелые металлы-защитные возможности почв и растений-урожай // Химические элементы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1982. С. 73-92.
- Копчик Г. Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение, 2014. №. 7. С. 851-851.
- Копчик Н.Г., Копчик С.В., Смирнова И.Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в кольской субарктике // Почвоведение, 2016. № 11. С. 1375-1391.
- Григорьян Б. Р., Грачев А. Н., Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Кольцова Т. Г., Рязанов С. С. Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // Вестник Казанского технологического университета, 2016. Том 19. №. 11. С. 185-189
- Gorovtsov A. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Perelomov L. V., Soja G., Zamulina I. V., Yao J. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil // Environmental Geochemistry and Health, 2019. P. 1-24.
- Joseph S., Lehmann J. Biochar for environmental management: science and technology. London: Earthscan, 2009. 438 p.
- Mukhin V.M., Burakov A.Ye., Burakova I.V. Active carbon as nanoporous material for solving environmental problems. Advanced materials and technologies, 2017. No. 2. P. 50–56.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА АКТИВНОСТЬ ОКСИДРЕДУКТАЗ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

МОСКВИН М.А., ДУБОВИЦКАЯ В.И., ТКАЧЕВА А.Ю., КОНОНЧУК П.Ю.

ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург,
voron27_88@mail.ru

Аннотация. В 90-дневном лабораторном эксперименте изучался катализирующий эффект полифенолоксидазы (ПФО) и пероксидазы (ПО) в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности при разной температуре (20 и 28°C) и влажности: 18, 21 и 24% – для среднеокультуренной (СОК) и 22, 25 и 28% – высокоокультуренной (ВОК) почвы. Отмечена общая тенденция снижения активности ПФО с увеличением температуры, тогда как для ПО с увеличением температуры интенсивность снижалась несущественно. Внесение биоугля приводило к достоверному увеличению активности как ПФО, так и ПО в почве с ВОК, по сравнению с почвами без биоугля, а в почве с СОК достоверное возрастание ПФО активности наблюдалось с 30 по 100 сутки эксперимента. Достоверные различия активности ПФО и ПО в почвах с разной влажностью наблюдались только между сухими и переувлажненными вариантами, причем наиболее существенные различия отмечены в вариантах с биоуглем. Расчёт коэффициента гумификации (по отношению ПФО/ПО) показал, что во всех вариантах эксперимента он был меньше 1, что свидетельствовало о преобладании процессов минерализации гумусовых веществ над их синтезом.

Ключевые слова. Температура. Влажность. Полифенолоксидаза. Пероксидаза. Биоуголь.

Введение

Интенсивность ферментативных процессов зависит от конкретных условий, складывающихся в почве, и изменчива в пространстве, т.е. может быть вертикальной и горизонтальной. Горизонтальная изменчивость зависит от изменения в течение года температуры, влажности и интенсивности поступления свежей органики. Вертикальный градиент зависит от изменения таких показателей как качество органического вещества и физические свойства почвы (Хазиев и Гулько, 1991).

Особое внимание в почве уделяется окислительным ферментам, которые привлекают внимание благодаря их роли в процессах гумификации. По современным представлениям катализаторами гумификации (окисления и полимеризации) разлагающихся лигнинов растительных остатков считаются микробные оксидазы – полифенолоксидазы (ПФО) и пероксидазы (ПО) (Van Gestel et al., 2013). Данные ферменты участвуют во всех этапах трансформации поступающего в почву органического вещества от синтеза гумуса до полной минерализации, но они специфичны в отношении типа катализируемой реакции. Например, ПФО окисляет полифенолы и их производные, ПО окисляет органические соединения в растениях (полифенолы и некоторые ароматические соединения) с помощью перекиси водорода или других органических перекисей (Zimmermann, Bird, 2012).

Разработка и внедрение новых ресурсосберегающих технологий в сельском хозяйстве, направленных на предотвращение негативного антропогенного воздействия на окружающую среду, являются приоритетными и актуальными. К числу подобных технологий относится внесение в почву карбонизированной биомассы, полученной путем пиролиза (высокотемпературное обугливание возобновляемого сырья в бескислородной среде). К настоящему времени установлено, что внесение биоугля в почву изменяет физические и

химические условия, которые влияют на деятельность микроорганизмов, контролирующих потоки С и N в биосфере (Рижия, 2020). Поэтому исследования влияния биоугля на активность окислительных ферментов (ПФО и ПО) при различных температурах почвы и влажности позволяют определить характер воздействия данного продукта на почвенный покров и раскрыть механизмы его взаимодействия с почвой. Полученные данные могут служить основой при создании рекомендаций по рациональному применению сельскохозяйственных мероприятий, необходимых для решения задач экологии по устойчивости и восстановлению системы «почва – растения – приземный слой атмосферы».

Цель исследования – изучение влияния температуры и влажности на активность полифенолоксидазы и пероксидазы в дерново-подзолистой супесчаной почве в лабораторных условиях.

Объекты и методы исследования

В связи с различной наименьшей влагоемкостью (НВ), которой характеризовались почвы с СОК и ВОК, принято решение изучать временную изменчивость основных характеристик биоугля при следующих уровнях содержания влаги: (1) соответствующее НВ почвы – норма: (2) ниже нормы НВ и (3) выше нормы НВ. Катализирующий эффект полифенолоксидазы и пероксидазы изучали в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности при разной температуре (20 и 28°C) и влажности: для среднеокультуренной: (1) 18, (2) 21 и (3) 24% и для высокоокультуренной: (1) 22, (2) 25 и (3) 28%. Компостирование почвы, весом 300 г, проводилось в вегетационных сосудах объемом 500 мл в биологических шкафах с заданными температурами. Влажность почвы поддерживалась весовым методом.

В качестве биоугля использовался древесный уголь из березы сорта «Премиум» (береза 1 класса), фракция с размером частиц угля 0,5 см. Произведен быстрым пиролизом при температуре 600°C. Содержание общего углерода в биоугле составляло 88 %, pH – 7,8.

Сравнительная агрохимическая характеристика изучаемых вариантов почв представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Агрохимическая характеристика пахотного горизонта (0-21 см) дерново-подзолистой супесчаной почвы разного качества (исходные данные до начала вегетационного периода 2020)

Почва	pH _{KCl}	C _{общ}	N _{общ}	Минеральный азот		Подвижные	
				N-NO ₃	N-NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O
		%		мг кг ⁻¹			
СОК	5,3	1,68	0,16	11,3	7,6	235	121
ВОК	6,4	2,73	0,27	16,5	9,7	692	322

Примечание – где здесь и далее: СОК – среднеокультуренная почва; ВОК – высокоокультуренная почва; pH_{KCl} – кислотность почвы; C_{общ} – содержание общего органического углерода; N_{общ} – содержание общего азота; N-NO₃ – содержание нитратного азота; N-NH₄ – содержание аммонийного азота; P₂O₅ – содержание подвижного фосфора; K₂O – содержание подвижного калия.

В эксперименте уделили внимание катализирующему эффекту пероксидазы (1,2,3-пирогаллол : H₂O₂-оксидоредуктаза, КФ 1.11.1.7) и полифенолоксидазы (О-дифенол : кислород-оксидоредуктаза, КФ 1.10.3.1). Выбор данных ферментов обусловлен их высокой чувствительностью к различным воздействиям и значимостью в трансформации органического вещества, от которой зависит цикл азота.

Определение проводилось по стандартным методикам биохимического практикума – фотокolorиметрическим методом (по Галстяну, 1972) при длинах волн 440 и 590 нм, соответственно, активность выражали в мг пурпургалина 100 г⁻¹ почвы в час.

Результаты и обсуждение

Исходя из значений активности ПФО в почвах было очевидно, что она достоверно ($p < 0,05$) зависела от степени окультуренности почвы, поскольку была в 1,3-1,4 раза больше в почве с БОК, чем в почве с СОК. С увеличением влажности почв, как с СОК, так и с БОК активность ПФО также повышалась, но без достоверных различий между вариантами.

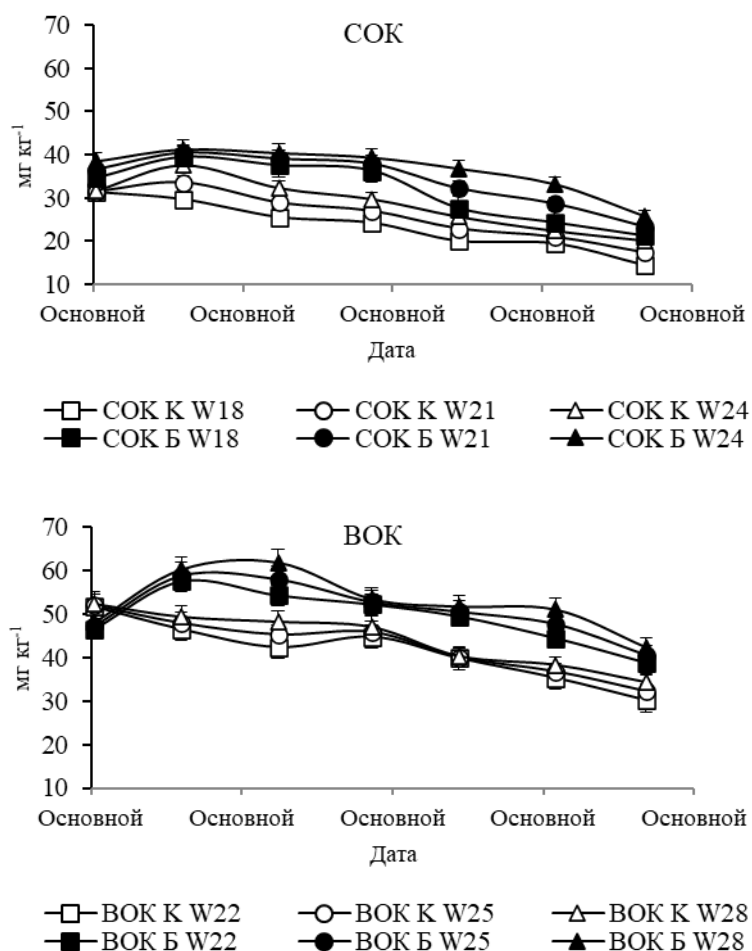


Рис. 1. - Динамика полифенолоксидазной активности дерново-подзолистых почв с разным качеством при внесении биоугля в вариантах почвы-контроль (К) и почвы с биоуглем (Б) при разном содержании влаги в лабораторном эксперименте при температуре 20°C.

Характер динамики активности ПФО описывался возрастающей кривой от начала вегетационного периода к его середине и ниспадающей кривой к его окончанию. Динамика активности ПФО в почве с биоуглем и без биоугля мало отличалась. Внесение биоугля в почву с БОК способствовало достоверному ($p < 0,05$) увеличению активности ПФО с её максимальными значениями в середине вегетационного периода – 68 мг пурпургалина на 100 г⁻¹ почвы час⁻¹. В

тоже время в почве с СОК также наблюдалось увеличение активности ПФО, но различия между вариантами с биоуглём и без биоугля были недостоверными во время вегетационного периода.

В почве с СОК (контроль) выявлены достоверные различия в активности ПФО между менее влажной почвой (18%) и более влажной почвой (24%) в течение периода наблюдений. Тогда как в контрольном варианте почвы с ВОК достоверные различия в активности ПФО наблюдали только в середине периода исследований.

Внесение биоугля привело к достоверному увеличению ПФО в почве с ВОК, по сравнению с почвами без биоугля, а в почве с СОК достоверное возрастание ПФО активности наблюдалось с 30 по 100 сутки эксперимента.

Для ПФО температура инкубации являлась существенным фактором. Отмечена общая тенденция снижения активности ПФО с увеличением температуры. Можно предположить, что при низкой температуре инкубации (20°C) доступный для микроорганизмов субстрат расходовался медленно, уровень микробной биомассы и активность полифенолоксидаз сохранялась на высоком уровне. Инкубация почвы при 28 °C приводила, по-видимому, к более быстрому исчерпанию доступных субстратов и кислорода, и уменьшению пула ПФО, так что активность ферментов, определенная после инкубации, оказалась намного ниже, чем для почвы, инкубируемой при 20 °C.

В отличие от ПФО, где с увеличением температуры инкубирования интенсивность полифенолоксидазной активности существенно снижалась, как в почве с СОК, так и ВОК, пероксидазная активность (ПО) с увеличением температуры снижалась несущественно, однако тренд снижения прослеживался.

Результаты исследования показали, что активность ПО почвы ВОК была несущественно выше, в среднем на 10-11%, чем в почве СОК, что связано с различиями в содержании общего углерода и общего азота (табл. 1).

В начале эксперимента в почве СОК максимальная активность ПО отмечена в почве с влажностью 21 %, несущественно ниже – в почве с влажностью 18 %, и достоверно ниже ($p<0,05$) в почве с избытком влаги – 24%. Активность ПО снижалась к 4-м суткам инкубирования в почве с влажностью 21%, оставалось неизменной в почве с влажностью 18% и возрастала в почве с влажностью 24%, но далее во всех вариантах наблюдалось снижение активности к концу эксперимента.

Внесение биоугля в почву способствовало увеличению активности пероксидазы по сравнению с вариантами без биоугля, однако без её достоверных межвариантных различий в течение периода наблюдений.

Расчёт Кгум (по отношению ПФО/ПО) показал, что во всех вариантах эксперимента он был меньше 1, что свидетельствовало о преобладании процессов минерализации гумусовых веществ над их синтезом. Однако в почве с ВОК этот показатель был в 1,7 раза выше, чем в почве с СОК, т.е. в почве с ВОК наблюдали более положительные условия для процессов гумусообразования.

Выводы

Таким образом, для ПФО температура инкубации являлась существенным фактором. Отмечена общая тенденция снижения активности ПФО с увеличением температуры, тогда как для ПО с увеличением температуры его интенсивность снижалась несущественно, однако тренд снижения прослеживался. Внесение биоугля привело к достоверному увеличению как ПФО, так и ПО в почве с ВОК, по сравнению с почвами без биоугля, а в почве с СОК достоверное возрастание ПФО активности наблюдалось с 30 по 100 сутки эксперимента. Достоверные различия активности ПФО и ПО в почвах с разной влажностью наблюдались только между

сухими и переувлажненными вариантами, причем наиболее существенные различия отмечены в вариантах с биоуглем. Расчёт Кгум (по отношению ПФО/ПО) показал, что во всех вариантах эксперимента он был меньше 1, что свидетельствовало о преобладании процессов минерализации гумусовых веществ над их синтезом

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных исследований, проект № 19-016-00038-А

Список литературы

Галстян А.Ш. К оценке биологической активности почв /Сб. тезисов докл. V съезда ВОП. Минск, 1977. Вып. 2. С. 201–202.

Рижия Е.Я., Вертебный В.Е., Хомяков Ю.В. Временные изменения степени ароматизации и окисления ароматических структур биоугля в результате его взаимодействия с дерново-подзолистой почвой / В сборнике: Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. 2020. С. 361–365.

Хазиев Ф.Х., Гулько А.Е. Ферментативная активность почва агроценозов и перспективы ее изучения // Почвоведение. 1991. №8. С. 88-103.

Van Gestel N.C., Reischke S., Baath E. Temperature sensitivity of bacterial growth in a hot desert soil with large temperature fluctuations // Soil Biology and Biochemistry. 2013. V. 65. P. 180–185.

Zimmermann M., Bird M.I. Temperature sensitivity of tropical forest soil respiration increase along an altitudinal gradient with ongoing decomposition // Geoderma. 2012. 187-188. P. 8–15.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND MOISTURE ON THE ACTIVITY OF POLYPHENOL OXIDASE AND PEROXIDASE IN SODDY-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL

MOSKVIN M. A., DUBOVITSKAYA V. I., TKACHYOVA A.Y., KONONCHUK P.Y.

Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

voron27_88@mail.ru

Abstract. In a 90-day laboratory experiment, the catalyzing effect of polyphenol oxidase and peroxidase was studied in soddy-podzolic sandy loam soil of varying quality at different temperatures (20 and 28 °C) and humidity: 18, 21 and 24% - for medium-quality and 22, 25 and 28% - for high quality soil. A general tendency for a decrease in polyphenol oxidase activity with an increase in temperature was found, while for peroxidase the intensity decreased insignificantly with an increase in temperature. The introduction of biochar led to a significant increase in polyphenol oxidase and peroxidase activity in the soil with high quality. In this soil, compared to the soil without biochar, and to the soil with medium quality, a significant increase in polyphenol oxidase activity was observed from 30 to 100 days of the experiment. Significant differences in the activity of polyphenol oxidase and peroxidase in the soil with different moisture were observed only between dry and waterlogged treatments, and the most significant differences were characteristic to the treatments with biochar. The humification coefficient (based on polyphenol oxidase / peroxidase relation) for all the treatments of the experiment was lower than 1, which indicated the predominance of the processes of mineralization of humic substances over their synthesis.

Keywords. Temperature. Humidity. Polyphenol oxidase. Peroxidase. Biochar.

О СТАБИЛИЗАЦИИ ГУМУСА АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БИОУГЛЯ

ОРЛОВА Н.Е.¹, ОРЛОВА Е.Е.¹, ШАХНАЗАРОВА В.Ю.^{1, 2}, СМИРНОВА К.А.¹

¹ СПбГУ, Санкт-Петербург,

² ФГБНУ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург - Пушкин

norlova48@mail.ru, n.orlova@spbu.ru

Аннотация. В 90-дневном инкубационном эксперименте изучено влияние декальцированного биоугля на содержание и состав гуминовых кислот агродерново-подзолистых почв разной степени гумусированности. Показано, что увеличение содержания устойчивых форм гуминовых кислот в составе их гумуса связано с высокой насыщенностью биоугля кальцием.

Ключевые слова. Гуминовые кислоты, гумификация, минерализация, биоуголь, кальций.

Введение

Биоуголь (БУ) является новым видом органогенных мелиорантов. Перспектива использования его в сельском хозяйстве, в том числе и Российской Федерации, обуславливает пристальное внимание исследователей к различным аспектам его действия на свойства и функционирование компонентов агроценозов. Особый интерес представляют сведения о влиянии БУ на состояние и процессы трансформации гумуса, так как от них зависят уровень плодородия и экологическая устойчивость почв. В ряде работ отмечалась значительная активизация минерализационных процессов органического вещества почв под действием БУ, что приводило к развитию процесса дегумификации (Rittl et al., 2015; Luo et al., 2017). Такие сведения ставят вопрос об экологической безопасности применения этого мелиоранта. Однако последние исследования показали, что под влиянием БУ в агродерново-подзолистых почвах наблюдалась активизация не только минерализации, но и гумификации, и, отчасти, процессов стабилизации гумуса (Orlova et al., 2019). Выявлено, что один из наиболее информативных показателей гумусового состояния почв – тип гумуса, под влиянием БУ менялся в сторону повышения гуматности. Кроме того, увеличивалось количество гуминовых кислот (ГК), связанных с кальцием. Оба этих факта являются характерными признаками увеличения стабилизация системы гумусовых веществ. Причем, если активизация под влиянием БУ процессов гумификации, вероятно, связана с изменением состава и структуры микробиоты (Шахназарова и др., 2020), то механизм увеличения в составе гумуса более устойчивых к микробиологической трансформации форм гуминовых веществ пока остается неясным. Возможно, при внесении БУ в почву создаются специфические условия для образования этой фракции – очень высокое содержание кальция и/или способность самого БУ к адсорбции ГК.

Цель работы – оценить возможные механизмы стабилизации гумуса агродерново-подзолистых почв при внесении в почву БУ. Задача исследования – сравнительное изучение трансформации гумуса при внесении в почву БУ, до и после его декальцирования.

Объекты и методы исследования

Основными объектами исследования явились пахотные горизонты (0-20 см) двух окультуренных дерново-подзолистых почв Гатчинского района Ленинградской области. Почвы

характеризовались аналогичным генезисом и структурой, но различались по содержанию гумуса: почва 1 – среднее, почва 2 – высокое. Биоуголь, используемый в эксперименте, был произведен быстрым пиролизом из древесины березы и осины при 550°C. Подробная характеристика БУ представлена ранее (Orlova et al., 2019). Декальцирование БУ осуществлялось обработкой его кислотой до отрицательной реакции на кальций аналогично традиционной операции декальцирования почв (Орлова, Бакина, Орлова, 2008). Эксперимент проводили в пластиковых сосудах при температуре 25°C и влажности 60% от полной влагоемкости, длительность инкубации 90 дней. Масса почвы в сосудах составляла 300 г в пересчете на сухое вещество. Исследовали 3 варианта опыта для каждой почвы: контроль (почва без добавок), почва + БУ, почва + БУ декальцированный (БУдек.). Концентрация БУ в почве составляла 1%. Повторность опыта 4-кратная. Для определения состава гумуса были использованы две отдельные вытяжки: непосредственная 0,1 М NaOH-вытяжка, которая извлекает гуминовые кислоты (ГК) и фульвокислоты (ФК), свободные и связанные с подвижными полутонкими оксидами (фракция 1), и 0,1 М Na₄P₂O₇-вытяжка, в которую переходят ГК и ФК, извлекаемые непосредственной щелочной вытяжкой, плюс ГК и ФК, связанные с кальцием (фракции 1 + 2). Оптическая плотность фракций, осаждаемых кислотой, была измерена при 465 нм (Е4). Для оценки степени бензоидности ГК использован индекс оптической плотности ($E_{\text{ГК}}^{\text{мг}} \text{ мл}^{-1}$).

Статистическую обработку данных проводили с помощью IBM SPSS Statistics, Version 25. Достоверность различий между средними оценивали с помощью теста Стьюдента-Ньюмена-Келса (Student-Newman-Keuls test) при $P < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Показано, что оба исследованных варианта БУ (и не обработанный, и декальцированный) за трехмесячный срок инкубации вызвали значительные изменения в содержании и составе гумуса агродерново-подзолистых почв. В характере изменений были выявлены как общие черты, так и различия (таблица).

Таблица. Влияние различных форм биоугля на содержание общего углерода и основных групп гуминовых веществ

Почва	Вариант опыта	С _{общ.} , %	Сумма ГК	Сумма ФК	С _{ГК} /С _{ФК}
			С, % к С _{общ.}		
Средне-гумусированная	Контроль	1,34 b*	22,4 а	22,4 b	1,00 а
	+БУ	1,17 а	27,4 с	21,4 а	1,28 с
	+БУдек	1,30 b	23,8 b	20,0 а	1,19 b
Высоко-гумусированная	Контроль	2,54 b	22,8 а	24,4 с	0,94 а
	+БУ	2,39 а	23,8 b	16,3 а	1,46 b
	+БУдек	2,45 а	25,0 с	19,6 b	1,34 b

* - разными буквами обозначены средние значения, статистически значимо различающиеся между собой при $P < 0,05$ (принадлежность к разным подмножествам).

Результаты изучения влияния БУ, не прошедшего операции декальцирования, на процессы трансформации гумуса полностью подтвердили выявленные ранее закономерности (Orlova et al., 2019). И в той, и в другой почве наблюдалось снижение содержания общего органического углерода, повышение доли ГК и снижение ФК в составе гумуса, расширение отношения $C_{\text{ГК}}$ к $C_{\text{ФК}}$, значительное увеличение количества ГК фракции 2 (рис.). Следует отметить, что гуминовые

кислоты этой фракции являются химически активными, способны к взаимодействиям по типу ионогенных связей, образуя гетерополярные соединения со щелочными и щелочноземельными катионами (в первую очередь, с кальцием) (Орлова, Бакина, Орлова, 2008), и в этой форме связи с минеральными компонентами обладают повышенной устойчивостью к микробиологическому воздействию.

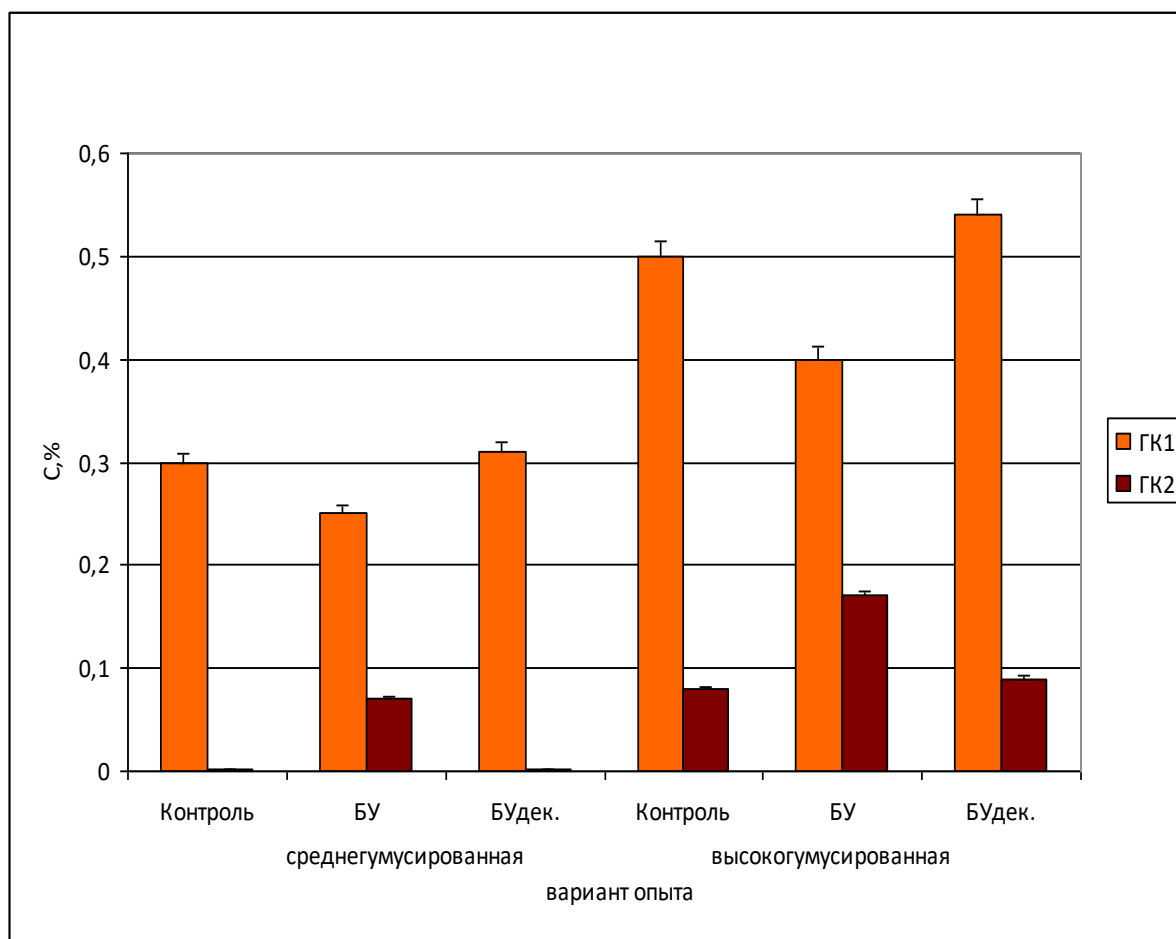


Рис. Влияние различных форм БУ на состав гуминовых кислот.

В вариантах эксперимента с декальцированным БУ в гумусовом состоянии исследованных почв также отмечено повышение количества ГК и отношения $C_{ГК}$ к $C_{ФК}$. Остальные изменения, вызванные воздействием на почвы БУдек., носили иной характер – активизация минерализационных процессов выражена только в почве с высоким содержанием гумуса, и значительно слабее, чем в варианте с неизмененным БУ. Возможно, это связано не только с потерей кальция при его предварительной обработке, но и потерей других элементов минерального питания, что и сказалось на снижении интенсивности микробиологических процессов. Кроме того, отсутствовали изменения в содержании ГК, связанных с кальцием – не было выявлено ни появления их в среднегумусированной почве, ни увеличение в высокогумусированной. Следовательно, образование этих форм ГК при внесении БУ в почвы обусловлено высоким содержанием в нем обменных форм кальция (Dai et al., 2017), и аналогично процессу, который наблюдается в почвах при их известковании или внесении кальций-содержащих мелиорантов.

Выводы

Внесение БУ в агродерново-подзолистые почвы вызывает как отрицательные (дегумификация), так и положительные (повышение устойчивости гумуса) изменения в трансформации органического вещества. Основными процессами стабилизации гумуса являются значительное расширение отношения гуминовых кислот к фульвокислотам и увеличение в составе гумуса устойчивых форм гуминовых кислот.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-016-00208а.

Список литературы

- Орлова Н.Е., Бакина Л.Г., Орлова Е.Е. (2008) Методы изучения органического вещества почв. СПб.: Изд. СПбГУ, 146 с.
- Шахназарова В.Ю., Орлова Н.Е., Орлова Е.Е., Банкина Т.А., Якконен К.Л., Рижия Е.Я., Кичко А.А. (2020) Изменения таксономического состава и структуры прокариотного сообщества агродерново-подзолистой почвы при внесении биоугля//Сельскохозяйственная биология, том 55, С. 163-173.
- Dai Z, Zhang X, Tang C, Muhammad N, Wu J, Brookes PC, Xu J. (2017) Potential role of biochars in decreasing soil acidification — a critical review. *Sci Total Environ.* 581:601–611.
- Luo Y., Zang H., Yu Z., Chen Z., Gunina A., Kuzyakov Y., Xu J., Zhang K., Brookes P. (2017) Priming effects in biochar enriched soils using a three-sourcepartitioning approach: ¹⁴C labelling and ¹³C natural abundance//*Soil Biol. Biochem.*, 106: 28-35.
- Orlova N., Abakumov E., Orlova E., Yakkonen K., Shahnazarova V. (2019) Soil organic matter alteration under biochar amendment practice: study on the Podzol soils of the Leningrad region (Russia)//*J. Soils and Sediments*, 1: 1-9.
- Rittl T.F., Novotnyb E.H., Balierob F.C. (2015) Negative priming of native soil organic carbon mineralization by oilseed biochars of contrasting quality//*European Journal of Soil Science.* 66: 714-721.

THE STABILIZATION OF AGRO SODDY-PODZOLIC SOIL HUMUS UNDER BIOCHAR

ORLOVA N.E.¹, ORLOVA E.E.¹, SHAHNAZAROVA V.Yu.^{1,2}, SMIRNOVA K.A.¹

¹ Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Russia
norlova48@mail.ru, n.orlova@spbu.ru

Abstract. The effect of decalcified biochar on the humic acids content and composition in agro soddy-podzolic soils with different humus content was studied in a 90-day incubation experiment. It was shown that the increase in the humic acids stable forms content was associated with the high saturation of biochar with calcium.

Keywords. Humic acids. Humification. Mineralization. Biochar. Calcium.

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАХОТНЫХ ГОРИЗОНТОВ АГРОТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОДБЕЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОУГЛЯ

ПОПОВА А.Д.^{1,2}, СЕМАЛЬ В.И.^{1,2}

¹ ДВФУ, Владивосток,

² ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, Владивосток

popova.ad@students.dvfu.ru; semal.va@dvfu.ru

Аннотация. В полевом опыте было изучено влияние биоугля на гидрофизические характеристики агротемногумусовых подбелов Приморского края, обладающих тяжёлым гранулометрическим составом. Основные гидрофизические характеристики показали, что на второй год после внесения биоугля в дозах 1 и 3 кг м⁻² – биоуголь не даёт заметных улучшений, но и не ухудшает показания водно-физических свойств пахотных горизонтов.

Ключевые слова. Биоуголь. Гидрофизические свойства. Пахотные почвы. Приморский край.

Введение

Водно-физические свойства являются одними из важных показателей в повышении плодородия агропочв. В условиях интенсивного земледелия почвы испытывают на себе сильную антропогенную нагрузку, подвергаются воздействию различных приемов возделывания культур, предусматривающих многократные проходы техники, больших норм удобрений и средств химизации, что может привести как к негативному влиянию на почву, так и на почвенные процессы (Козыбаева, 2017).

Для агропочв Приморского края характерен тяжелый гранулометрический состав (Ивлев, 2001), в совокупности с влиянием механического воздействия на почвы приводит к ухудшению условий роста и развития растений, а это, в свою очередь, может снизить урожай сельскохозяйственных культур. Одним из предлагаемых путей решения этих проблем является внесение в почву биоугля.

Цель исследования: показать изменение гидрофизических показателей пахотных горизонтов агротемногумусовых подбелов при использовании различных доз биоугля на второй год эксперимента. В задачи входило: проследить изменения в показаниях объёмной массы (ОМ) и почвенно-гидрологических констант (полная влагоёмкость (ПВ), наименьшая влагоёмкость (НВ), влажность разрыва капилляров (ВРК), диапазон легкоподвижной влаги (ДЛВ)) пахотных горизонтов агротемногумусовых подбелов при добавлении биоугля дозами 1 и 3 кг/м² на дренажной и бездренажной системах. Отбор проб почв выполнялись по общепринятым методикам; гидрофизическая характеристика почв – с помощью методики определения ГФС почв из одного мезомонолита (4-5 повторностей).

Объекты и методы исследования

Объекты исследования расположены в прибрежной агроклиматической зоне Приморского края на территории экспериментального опытного участка (6 га) с овощным севооборотом с применением глубокого дренажа (Д) (120 см) и без дренажа (БД) на территории Приморской овощной опытной станции — филиала ФГБНУ «ФНЦ овощеводства» (с. Суражевка). Почвы представлены агротемногумусовыми подбелами на делювиальных отложениях глинистых сланцев. Биоуголь (из древесных остатков березы *Betula alba*, получен методом пиролиза при

температуре 360–380°C) в дозах 1 и 3 кг м⁻² был заложен в пахотный горизонт в июне 2018 г., почвенные образцы были отобраны в 2018-2020 год.

Результаты и обсуждение

Плотность почвы на бездренажной системе осень 2019 года пахотные горизонты более уплотнены (1,21±0,05 (контроль), 1,24±0,04 (1 кг), 1,15±0,11(3 кг)) по сравнению с весной 2019 (1,01±0,04 (контроль), 0,96±0,14 (1 кг), 0,99±0,05 (3 кг)) и 2020 годов (1,00±0,03 (к), 1,14±0,04 (1 кг), 1,11±0,09 (3 кг)) - в этот период была фаза полного созревания сои, на дренажной системе в этот период был уже собран картофель. Сравнивая с контролем, значения объемной массы в вариантах с биоуглем иногда повышаются, объяснить это можно тем, что возможно биоуголь распадаясь на частички, частично блокирует поры, тем самым увеличивая плотность почвы, но это не повлияло отрицательно на оценку плотности горизонтов.

Полная влагоёмкость – наибольшее количество гравитационной воды, которое может вместить почва при полном заполнении всех пор водой, за исключением занятых “защемленным” и адсорбированным воздухом (Шеин, 2005). Значения полной влагоёмкости в варианте опыта без дренажа весной 2019 (57,8±1,6 (к), 56,9±2,6 (3 кг)) практически на уровне значений через год (58,5±1,5% (к), 56,8±3,8% (3 кг)). Однако в первом случае биоуголь в дозе 1 кг увеличивает водовместимость (66,5±0,8%), а во втором – уменьшает (48,7%). В дренажной системе наблюдается заметное повышение значений весной 2020 года с увеличением дозы биоугля (64,7 ±1,2% (3 кг)) по сравнению с контролем (49,6%).

Наименьшая влагоёмкость - наибольшее количество капиллярно-подвешенной влаги, которую почва способна удерживать капиллярными силами после свободного стекания гравитационной влаги. Это очень важная характеристика, указывающая на водоудерживающую способность почвы. Значения НВ на обеих системах осень 2019 года (25,6–26,8 ± 0,9–1,7%) – оценивается как неудовлетворительно и удовлетворительно по шкале оценки (таблица 1). На дренажной системе биоуголь повысил значения НВ осенью 19 года (28,3±0,9% (3 кг)) и весной 20 года (44,9±1,7% (3 кг)), и получила оценку – хорошая и наилучшая. В остальных вариантах видимых изменений не произошло.

Таблица 1. Оценка значений наименьшей влагоёмкости (Ознобихин, 1985)

НВ, %	Оценка
40–50	наилучшая
30–40	хорошая
25–30	удовлетворительная
Менее 25	неудовлетворительная

Влажность разрыва капилляров - характеризует заметное уменьшение подвижности капиллярной влаги, когда почвенная капиллярная влага уже не представляет собой единой гидравлической связи, а распадается на отдельные капилляры и остается в виде пленок. Движение воды, ее доступность для растений резко снижается. Эта влага неподвижна, но физиологически доступна корешкам растений (Шеин, 2014). Значения сильно не варьируют во

всех вариантах опыта, самые низкие значения наблюдаются осенью 2019 года на обеих системах. В варианте биоуголь 3 кг на дренажной системе ($35,9 \pm 1,3\%$) на второй год значения повысились по сравнению с контролем ($29,7 \pm 4,1\%$ (к)).

Диапазон легкоподвижной, легкодоступной для растений влаги (НВ – ВРК) – рассматривается как категория между отдельными гидрологическими константами. Это наиболее эффективная часть той продуктивной влаги, которая характеризуется диапазоном (НВ–ВЗ). Этот диапазон влажности следует поддерживать в корнеобитаемом слое, чтобы избежать непродуктивных потерь влаги на стекание ее в нижележащие слои и в то же время способствовать наиболее эффективной работе фотосинтетического аппарата растений (Шеин, 2014). Здесь наблюдается похожая тенденция, что и предыдущей почвенно-гидрологической константе. Значения осеннего периода на обеих системах ниже, чем в весенние периоды. Есть тенденции к повышению значений в варианте с биоуглем на второй год ($9,0 \pm 0,3\%$ (3 кг)).

Выводы

Таким образом, объемная масса на обеих системах незначительно увеличилась в весенний период 2020 года по сравнению с 2019 годом. В некоторых вариантах с биоуглём произошло повышение значений объёмной массы. Все варианты имеют оптимальную плотность.

1) Полная влагоёмкость эксп. (%) варианте опыта без дренажа весной 2019 практически на уровне значений через год. Однако в первом случае биоуголь в дозе 1 кг увеличивает водовместимость ($66,5 \pm 0,8\%$), а во втором – уменьшает ($48,7\%$). В дренажной системе наблюдается заметное повышение значений весной 2020 года с увеличением дозы биоугля по сравнению с контролем.

2) Наименьшая влагоёмкость эксп. (%) на обеих системах осень 2019 года – оценивается как неудовлетворительно и удовлетворительно. На дренажной системе биоуголь повысил значения НВ осенью 19 года и весной 20 года, и получила оценку – хорошая и наилучшая.

3) Влажность разрыва капиллярной связи (%) в обеих системах значения контроля и варианты опыта с биоуглем сильно не варьируют, однако в весенний период 20 года, наблюдается увеличение значений ВРК в дозе 3 кг биоугля ($35,9 \pm 1,3\%$).

4) Диапазон легкоподвижной влаги (%) биоуголь в дозе 3 кг м⁻² увеличивает значения в весенний период 2020 года на обеих системах, в остальных вариантах значения сильно не варьируют.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05166.

Список литературы

- Ивлев, А. М. Агрохимия почв юга Дальнего Востока: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Почвоведение» / А. М. Ивлев, В. И. Дербенцева, В. И. Голов, В. Г. Трегубова. М.: Круглый год, 2001. 104 с.
- Козыбаева Ф. Е., Бейсеева Г. Б., Токтар М., Ажикина Н. Ж. Влияние биоугля на водно-физические свойства и структурное состояние предгорных темно-каштановых почв Заилийского Алатау // International scientific and practical conference world science. 2017. №5 (21). С. 16-21.
- Ознобихин В. И., Синельников Э.П. Характеристика основных свойств почв и пути их рационального использования. Уссурийск: Прим. с.-х. ин-т, 1985. 72 с.
- Шеин, Е. В. Курс физики почв: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
- Шеин, Е. В. Агрофизика: учеб, пособие / Е. В. Шеин и др.; Владим. Гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. - Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014.-92 с.

THE HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF ENDOARGIC ANTHROSOLS PLOUGHED HORIZON WITH BIOCHAR

POPOVA A.D.^{1, 2}, SEMAL V. I.^{1, 2}

¹ FEFU, Vladivostok, Russia

² Federal Scientific center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Vladivostok, Russia

popova.ad@students.dvfu.ru; semal.va@dvfu.ru

Abstract. In a field experiment the effect of biochar on hydrophysical characteristics of heavy Endoargic Anthrosols of Primorsky Krai was studied. The main hydrophysical characteristics showed that in the second year after biochar application in rates of 1 and 3 kg m⁻² – biochar did not have any positive effect on the studied soil properties, but did not worsen the indications of water-physical properties of arable horizons either.

Keywords. Biochar. Hydrophysical properties. Arable soils. Primorsky Krai.

СТАРЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ БИОУГЛЯ В ПОЧВЕ

РИЖИЯ Е. Я.^{1,2}, БАЛАШОВ Е. В.¹, ХОМЯКОВ Ю. В.¹, ВЕРТЕБНЫЙ В. Е.¹, ДУБОВИЦКАЯ В. И.¹, МОСКВИН М. А.¹

¹ ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург,

² ФГБОУ ВО «РГГМУ», Санкт-Петербург

alenaarizh@yahoo.com; agrophys.inst@yandex.ru

Аннотация. В вегетационно-полевом эксперименте на дерново-подзолистой супесчаной почве с различной степенью окультуренности изучалось изменение удельной поверхности и химического состава биоугля, внесенного в дозе 20 т га⁻¹. Удельная поверхность биоугля изучалась по методу адсорбции метиленового голубого (ГОСТ 13144-79), химический анализ биоугля выполняли на элементном анализаторе Euro EA3028-HT (EuroVector, Италия). Результаты исследования показали, что нахождение («старение») биоугля в вариантах почв способствовало повышению его удельной поверхности и увеличению содержания кислородсодержащих функциональных групп. Результаты расчётов отношений Н/С, О/С и (О+Н)/С свидетельствовали о том, что степень ароматизации органического вещества биоугля в первый год исследований оставалась постоянной, но ароматическое органическое вещество биоугля из почвы с более низким качеством было в большей степени подвержено минерализации

Ключевые слова. Биоуголь. Дерново-подзолистая почва. Старение. Удельная поверхность. Химический состав угля.

Введение

Использование биоугля для секвестрации углерода в почвах и улучшения показателей почвенного плодородия привлекло научное внимание во всем мире. Биоуголь - это обугленная биомасса, производимая при помощи пиролиза в условиях ограниченного поступления кислорода или при полном его отсутствии (Lehmann et al., 2011). Во время пиролиза алифатические цепи С в исходном сырье превращаются в ароматический С (Zeng et al., 2011), и в таком виде биоуголь может сохраняться в почве в течение сотен и тысяч лет (Knicker et al., 2013; Kuzyakov et al., 2009). Следовательно, внесение биоугля в почву может связывать С, ослабляя увеличение содержания углекислого газа (CO₂) в атмосфере (Lehmann, 2007). Кроме того, во многих исследованиях было установлено, что биоуголь способен снижать эмиссию закиси азота (Рижия и др., 2015), увеличивать порозность аэрации и влагоудерживающую способность (Basso et al., 2013), уменьшать вымывание питательных веществ из почвы и повышать урожайность сельскохозяйственных культур (Мухина, 2017).

Однако большинство работ не учитывает те физические и химические изменения, которые происходят в биоугле в результате его прогрессирующего «старения» при внесении в почву (Major et al., 2010; Rechberger et al., 2017). После внесения в почвы ароматические структуры, пористое пространство и поверхность биоугля подвергаются воздействию микроорганизмов и взаимодействуют с почвенными органическими и неорганическими соединениями, минералами и растворами. Например, изучение «старения» биоугля, приготовленного из различного сырья, продолжительности окисления и температуры в искусственных лабораторных условиях (с использованием водяного пара или воздуха, также как и с использованием различных химических реагентов), показали, что в мелиоранте изменялась удельная

поверхность за счет удаления летучих органических соединений (Vithanage et al., 2015), элементный состав и функциональные группы (Mia et al., 2017), уменьшалась лабильная фракция (Singh and Cowie, 2014). Поскольку внесение в почвы биоугля как органического мелиоранта является необратимым, оценка временных изменений его ароматической структуры и элементного состава также необходима для обоснованного выбора рациональных способов его длительного применения. Таким образом, для обоснования эффективности использования биоугля в сельскохозяйственных почвах необходимо четко представлять направленность его изменений, протекающих в почве. Поэтому цель данного исследования – изучение старения и трансформации биоугля в полевых условиях дерново-подзолистой почвы по изменению его удельной поверхности и химического состава.

Объекты и методы исследования

Полевые исследования проводились на территории экспериментальной опытной станции ФГБНУ АФИ (МОС-АФИ) (п. Меньково, Гатчинский район, Ленинградская область). На Агрофизическом стационаре МОС-АФИ в мае 2019 года был заложен вегетационно-полевой эксперимент. Объект исследования - дерново-подзолистые супесчаные почвы. Опытные делянки размером 4 м² (2×2 м) были заложены на парцеллах почв со средней (СОК) и высокой (ВОК) степенью окультуренности, на контрольных участках (без дополнительного внесения различных доз минеральных удобрений). Почва имела слабокислую реакцию среды, среднее содержание общих углерода и азота (1,72 и 0,11 % и 2,94 и 0,17 %, соответственно), достаточное количество минерального азота и калия, высокое содержание фосфора. Отношение С к N (11,7 и 17,3, соответственно) указывает на преобладание в вариантах почв процессов минерализации.

В качестве биоугля использовался древесный уголь из березы сорта «Премиум» (береза 1 класса), фракция с размером частиц угля 0,5–5,0 см. Произведен быстрым пиролизом при температуре 600 °С на предприятии ООО «Файервуд» (Ленинградская обл, Тосненский р-н, д. Коркино). Перед внесением в почву биоуголь просеивали через сито с размером ячейки 2 см. Таким образом, для эксперимента использовали фракции биоугля меньше 2 см в диаметре. Биоуголь вносили в верхний 10-см слой почвы вручную. На 87% биоуголь был представлен циклическими и ароматическими соединениями углерода. Азот содержался в количестве 0,4%, в основном в форме аммония, нитраты отсутствовали. В дефиците находился фосфор – 8,3 мг кг⁻¹, калий – 73 мг кг⁻¹. Биоуголь содержал очень большое количество кальция и магния, чем объяснялась его щелочная реакция (рН = 7,8).

Таким образом, схема опыта включала по два варианта в 3-кратной повторности: (1) Контроль (без биоугля) и (2) почва с биоуглем в дозе 20 т га⁻¹.

Удельная поверхность биоугля изучалась по методу адсорбции метиленового голубого (ГОСТ 13144-79) и рассчитывалась, исходя из количества метиленового синего, адсорбировавшегося на биоугле и оставшегося в растворе.

Химический анализ биоугля выполняли на элементном анализаторе Euro EA3028-NT (EuroVector, Италия) для одновременного определения CHNS-O. Сжигание проб осуществлялось в токе чистого кислорода с последующим восстановлением окислов азота и разделением газообразных продуктов окисления на хроматографической колонке с детектированием по теплопроводности. Определение содержания элементов осуществляется на основе содержания в продуктах сгорания CO₂, H₂O, N₂. Прибор дооснащен приставкой и набором расходных материалов для определения кислорода и серы, путем анализа продуктов восстановления в атмосфере гелия.

Результаты и обсуждение

Древесный уголь представляет собой пористый углеродный адсорбент с развитой внутренней удельной поверхностью, состоящей из открытых пор и капиллярных каналов. Например, в одном грамме активированного угля эта поверхность может достигать 1000 м^2 .

Результаты полевого эксперимента показали, что нахождение («старение») биоугля в почве увеличивало удельную поверхность исходного угля и формировало на его поверхности кислородсодержащие функциональные группы. Так в почве с СОК установлено увеличение его удельной поверхности от $270 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$ в начале вегетационного периода до $340 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$ в его середине, что связано с изменением плотности поверхностных кислородсодержащих функциональных групп, исходя их полученных данных по ИК-спектроскопии. Однако к концу вегетационного периода значения данного показателя несущественно снизились, достигая величины $320 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$.

Присутствие биоугля в почве с ВОК не привело к достоверному изменению его удельной поверхности, которая варьировала от 270 до $280 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$. В конце вегетационного периода удельная поверхность биоугля уменьшилась по сравнению с её значениями в середине вегетационного периода. Снижение удельной поверхности биоугля в обеих почвах могло быть обусловлено закупоркой его пор минеральной тонкодисперсной твёрдой фазой почвы, органическим веществом почвы или минеральной твёрдой фазой (зола) биоугля (Bakshi et al., 2016).

Результаты наших исследований показали, что присутствие биоугля в почвах с СОК и ВОК с 22 мая по 25 сентября привело к уменьшению содержания углерода, входящего в легкодоступные органические соединения, ассоциированные с поверхностью биоугля. В почве с ВОК наблюдали недостоверно большее снижение содержания углерода в биоугле. Эти данные подтверждают, что микробное сообщество в обеих почвах могло быть одним из главных факторов минерализации легкодоступных органических соединений биоугля (Bird et al., 2008). Содержание азота в биоугле из почвы с СОК и ВОК не изменялось достоверно в течение периода наблюдений. Установлено, что межвариантные различия в содержании азота в биоугле также были недостоверными.

Тем не менее, отношения C/N в биоугле из почвы с ВОК были достоверно ($p < 0.05$) меньше, чем в биоугле из почвы с СОК в период наблюдений. Эти данные показывают, что старение биоугля в почве с ВОК может оказать более благоприятное влияние на процессы трансформации минеральных форм азота и на отношение C/N в этой почве.

Во время периода наблюдений содержание кислорода в биоугле из почвы с ВОК увеличивалось более интенсивно, чем в биоугле из почвы с СОК. Повышение содержания кислорода в биоугле, возможно, обусловлено процессами хемосорбции кислорода благодаря формированию кислородсодержащих функциональных групп на поверхности биоугля (Cheng et al., 2006). Содержание водорода в биоугле из почвы с ВОК, в отличие от почвы с СОК, уменьшалось во время периода наблюдений, возможно, вследствие реакций конденсации органических соединений (Keiluweit et al., 2010). Установлены достоверные ($p < 0.05$) межвариантные различия в содержании водорода в биоугле из почв с СОК и ВОК.

Отношения H/C, O/C и (O+N)/C используют для оценки степени ароматизации органического вещества биоугля, окисленности и поляризации поверхности биоугля. Результаты расчётов отношения H/C свидетельствуют о том, что степень ароматизации органического вещества биоугля оставалась постоянной и была недостоверно выше в биоугле из почвы с ВОК, чем в биоугле из почвы с СОК. Возможно, ароматическое органическое вещество биоугля из почвы с СОК было в большей степени подвержено минерализации. Отношения O/C в обеих почвах достоверно не различались во время периода наблюдений и свидетельствовали о

практически одинаковой степени окисленности поверхности биоугля. Тем не менее, отношения $(O+N)/C$ увеличивались от 0.064 (в мае) до 0.083 (в октябре) в биоугле из почвы с СОК и от 0.064 (22 мая) до 0.099 (25 сентября) в биоугле из почвы с ВОК, но межвариантные различия между этими отношениями были недостоверными. В целом, наблюдаемые временные изменения отношения $(O+N)/C$ свидетельствуют о большей интенсивности формирования кислородсодержащих функциональных групп на поверхности биоугля в почве с ВОК. Повышение концентрации этих групп на поверхности биоугля в почве с ВОК скорее всего способствовало увеличению её ёмкости катионного обмена, водоудерживающей способности и содержанию в ней минеральных форм азота.

На данный момент изучается второй год старения и трансформации биоугля в почве, которые расширят полученные данные.

Заключение

Таким образом, нахождение («старение») биоугля в почвах способствовало повышению его удельной поверхности и увеличению содержания кислородсодержащих функциональных групп. В почве с высокой степенью окультуренности наблюдали недостоверно большее снижение содержания углерода в биоугле. Микробное сообщество в обеих почвах являлось одним из главных факторов минерализации легкодоступных органических соединений биоугля. Результаты расчётов отношений N/C , O/C и $(O+N)/C$ свидетельствовали о том, что степень ароматизации органического вещества биоугля в первый год исследований оставалась постоянной, но ароматическое органическое вещество биоугля из почвы с более низким качеством было в большей степени подвержено минерализации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, проект № 19-016-00038-А

Список литературы

- Мухина И.М. Влияние карбонизированной биомассы на параметры плодородия дерново-подзолистых почв и эмиссию парниковых газов: дис. ... канд. биол. наук / 06.01.03. СПб., 2017. 187 с.
- Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В. 2015. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент). Почвоведение, 2015, №2, С. 211-220.
- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D. Biochar effects on soil biota – A review. Soil Biology and Biochemistry. 2011. V. 43, Issue 9. Pp. 1812-1836.
- Zeng L., Qin C., Wang L., Li W. Volatile compounds formed from the pyrolysis of chitosan. Carbohydrate Polymers. 2011. V. 83, Issue 4. Pp. 1553-1557.
- Knicker H., González-Vila F.J., González-Vázquez R. Biodegradability of organic matter in fire-affected mineral soils of Southern Spain. Soil Biology and Biochemistry. 2013. V. 56. Pp. 31-39.
- Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling. Soil Biology and Biochemistry. 2009. V. 41, Issue 2. Pp. 210-219.
- Lehmann J. A handful of carbon. Nature. 2007. V. 447. Pp. 143–144.
- Basso A.S., Miguez F.E., Lair, D.A., Horton R., Westgate, M., Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. GCB Bioenergy. 2013. V. 5. Pp. 132–143.
- Major J., Lehmann J., Rondon M., Goodale C., Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. Glob. Chang. Biol. 2010. V.16. Pp. 1366–1379.

- Rechberger M.V., et al. Changes in biochar physical and chemical properties: accelerated biochar aging in an acidic soil. *Carbon*. 2017. V. 115, 209–219.
- Vithanage M., et al., Acid-activated biochar increased sulfamethazine retention in soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22, 2175–2186.
- Singh B.P., Cowie A.L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralization in a low-carbon clayey soil. *Sci Rep*. 2014. V.4 Pp.3687.
- Mia S., Dijkstra F.A., Singh B. Chapter one - long-term aging of biochar: a molecular understanding with agricultural and environmental implications. In: Donald, L.S. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press. 2017. Pp. 1–51.
- Bakshi S., Aller D. M., Laird D. A., & Chintal, R. Comparison of the physical and chemical properties of laboratory and field-aged biochars. *Journal of environmental quality*. 2016. V. 45(5). Pp. 1627-1634.
- Bird M. I., Wynn J. G., Saiz G., Wurster C. M., & McBeath, A. The pyrogenic carbon cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2015. V. 43. Pp. 273-298.
- Cheng C.H., Lehmann J., Thies J.E., Burton S.D., Engelhard M.H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Org. Geochem*. 2006. 37. Pp. 1477–1488.
- Keiluweit M., Nico P. S., Johnson M. G., & Kleber M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental science & technolog.* V. 44(4). Pp. 1247-1253.

AGING AND TRANSFORMATION OF BIOCHAR IN LOAMY SAND PODZOLIC SOIL

RIZHIYA E. Y.^{1,2}, BALASHOV E. V.¹, KHOMYAKOV Y. V.¹, VERTEBNIY V. E.¹, DUBOVITSKAYA V. I.¹,
MOSKVIN M. A.¹

¹ *Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia*

² *Institute of Organic Fertilizer and Peat, p. Vyatkinskoye Vladimir region, Russia*

alনারিজ@yahoo.com

Abstract. In a vegetation-field experiment on a sandy loam Sod-podzolic soil with different degree of quality the change in the specific surface area and chemical composition of biochar applied at a rate of 20 t ha⁻¹ were studied. The specific surface area of biochar was studied using the adsorption method of methylene blue (GOST 13144-79); chemical analysis of biochar was performed on an elemental analyzer Euro EA3028-NT (EuroVector, Italy). The study results showed that the “aging” of biochar in soil promoted an increase in its specific surface area and an increase in the content of oxygen-containing functional groups. The results of calculations of the H / C, O / C, and (O + N) / C ratios indicated that the degree of aromatization of biochar organic matter in the first year of research remained constant, and the aromatic organic matter of biochar from the soil with lower quality was more affected by mineralization.

Keywords. Biochar. Sod-podzolic soil. Aging. Specific surface area. Chemical composition of biochar.

АГРОТЕМНОГУМУСОВЫЕ ПОДБЕЛЫ КАК ПРИМЕР СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЧВ ЮГА ПРИМОРСКОГО КРАЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ БИОУГЛЯ

СЕМАЛЬ В.А.^{1,2}, НЕСТЕРОВА О.В.¹, КАРПЕНКО Т.Ю.^{1,3}, БРИКМАНС А.В.¹, САКАРА Н.А.⁴

¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

² ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, г. Владивосток

³ Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток

⁴ Приморская овощная опытная станция — филиал ФГБНУ «ФНЦ овощеводства»,
с. Суражевка

semal.va@dvfu.ru

Аннотация. Для долговременного изучения влияния внесенного биоугля в почвенную систему предлагаются для исследования агротемногумусовые подбелы как одни из основных пахотных почв юга Приморского края. Рассматриваются основные почвенные показатели, характеризующие «ноль»-момент или контроль. Разработана схема опыта для внесения биоугля с учетом вносимых органических и минеральных удобрений и наличия/отсутствия закрытой дренажной системы.

Ключевые слова. Anthric Luvisol. Луговой подбел. Лугово-бурые почвы. Биоуголь. Приморский край.

Введение

С точки зрения применения биоугля в сельском хозяйстве и его преимуществ для выращиваемых культур и окружающей среды, наиболее важными вопросами представляются следующие. Существует значительная потребность в исследованиях, выполненных в реальных полевых условиях (Gurwick, 2013). Большинство опубликованных работ основываются на лабораторных экспериментах и экспериментах в теплицах, а не на полевых исследованиях, причем на основе последних опубликованы не более 26% всех работ о биоугле (Zhang, 2016). Однако многие важные аспекты воздействия биоугля на почву и соответствующие параметры экосистемы зависят от местных условий, таких как тип почвы и степень ее насыщенности водой, особенностей ведения сельского хозяйства и климата. Изменчивость этих факторов и, в частности, разнообразие их комбинаций трудно, а порой и невозможно воспроизвести в лабораторных исследованиях. Существует необходимость установить конкретные критерии по норме применения различных видов биоугля для определенных типов почв. Большинство исследований проводилось в лабораторных условиях с использованием большого количества биоугля (Angst, 2014), следовательно, теперь необходимо исследовать применение биоугля в реальных условиях, которые бы стимулировали положительные эффекты, при этом не влияя отрицательно на рост урожая.

Среди развитых экономик существуют примеры стран и почвенно-климатических условий, которые недостаточно исследованы и Россия находится среди них (Zhang, 2016). Большинство экспериментов и испытаний было проведено с использованием обычных зерновых культур, таких как кукуруза, пшеница, рис, но важно изучить влияние биоугля на овощи и плодовые культуры в полевых условиях.

Даже несмотря на увеличение количества исследований о биоугле, опубликованных с 2011 года (Gurwick, 2013, Zhang, 2016), по-прежнему не хватает данных, чтобы сделать выводы о том, как применение биоугля повлияет на общую глобальную секвестрацию углерода, выбросы

парниковых газов или урожайность широкого спектра сельскохозяйственных культур. Точный срок действия биоугля до сих пор сложно оценить и поэтому необходимы дополнительные исследования для более точной количественной оценки скорости разложения биоугля в почве (Ding, 2016). Необходимо больше данных для полного понимания прямых и косвенных механизмов, интерпретирующих воздействие биоугля.

Только в последнее время ученые сосредоточились на изучении влияния биоугля на физические и гидравлические свойства различных почв, однако исследования демонстрируют неоднозначные результаты (Asai, 2009, Novak, 2009, Brockhoff, 2010, Busscher, 2010). Необходимы дополнительные исследования о влиянии биоугля на широкий спектр свойств почвы.

Объекты и методы исследования

Полевой опыт был заложен в июне 2018 года на территории ООО «Приморской овощной опытной станции ВНИИО» (с. Суражевка, Приморский край) (рис. 1) для оценки влияния внесения различных доз биоугля в совокупности с минеральными и органическими удобрениями и различными водно-воздушными условиями почв (поле с дренажной системой (глубина закладки 120 см) и поле без дренажной системы) на физические и химические свойства почв, эмиссию парниковых газов и рост и развитие растений, расчета экономической рентабельности внесения биоугля.

Поле без дренажной системы			Поле с дренажной системой		
БДОргК	БДОрг1кг	БДОрг3кг	ДОрг3кг	ДОрг1кг	ДОргК
БДМинК	БДМин1кг	БДМин3кг	ДМин3кг	ДМин1кг	ДМинК
БДК	БДК1кг	БДК3кг	ДК3кг	ДК1кг	ДК

БД - без дренажа; Д – дренаж; К – контроль; Мин – минеральные удобрения; Орг – органические удобрения; 1 кг, 3 кг – дозы внесения биоугля в расчете на 1 м².

Рис. 1. Схема опыта.

Отбор образцов почв осуществлялся по ГОСТ 28168-89. Морфологическое описание разрезов проведено по ГОСТ 17.4.2.03-86. В образцах почв были определены: плотность твердой фазы, гранулометрический состав, кислотно-щелочные свойства, общее содержание углерода, определение легкорастворимых фосфатов, легкогидролизуемого азота и подвижного калия по общепринятым методикам.

Результаты и обсуждение

Почвы представлены темногумосовым подбелом (Классификация почв России, 2004) или Anthric Luvisol (WRB), луговые подбелы (Классификация и диагностика почв СССР, 1977), лугово-бурые почвы (Указания по классификации и диагностике почв), лугово-бурые отбеленные почвы (Иванов, 1976). Основные ареалы этих почв используются в сельском хозяйстве Приморского края.



На контрольных участках (без внесения удобрений) были заложены разрезы:

AR (0–30 см) – агрогумусовый, темно-серый, 10YR3/2, тяжелосуглинистый, крупнопылеватый, распадается на глыбы мелких размеров и комки, корневые волоски и мелкие корни диаметром до 2 мм, встречаются во всей толще горизонта, переход четкий, граница ровная;

EI (30–49 см) – элювиальный отбеленный, серовато- белый с желтоватым и оранжевым оттенком, 10YR 6/4, среднесуглинистый, тонкослоистый, плитчатая структура распадается на мелкие чешуйки, уплотнен, корневые волоски встречаются редко, марганцевые конкреции, осветляющие примазки, пятнистый, переход не очень четкий, постепенный;

BT1 (49– 83 см) – текстурный, буро-желтовато-коричневый, плотный, глинистый, многопорядковая структура: призмы делятся на горизонтальные плитки, раскалывающиеся на мелкие орехи, похож на творог, много железистых стяжений, плотный, пластинчатый, вязкий, переход постепенный, малозаметный;

BT2 (83 –1 04 см) – текстурный, коричневато-бурый, немного темнее вышележащего, выраженные вертикальные трещинки заполнены стяжениями, структура уплотняется (призма плитка орех крупнее), очень плотный, вязкий, есть тонкие поры, глинистый, липкий.

Почва: агротемногумусовый подбел на делювиальных отложениях глинистых сланцев (без дренажа).



AR (0–27 см) – агрогумусовый, темно-серый (10YR3/2), тяжелосуглинистый, крупно пылеватый, мелкокомковатый, корневые волоски и мелкие корни диаметром до 2 мм, встречаются во всей толще горизонта; переход по плужной подошве, неровный;

EI (27–43 см) – элювиальный, серовато-желтовато-белый до светло-коричневого (7,5YR 5/8), среднесуглинистый, уплотнен, корневые волоски встречаются реже, чем в вышележащем горизонте, с большим количеством железистых конкреций и пятен, меньше вертикальных трещин, менее плотный, чем в разрезе 1, переход постепенный;

BT1 (43–79 см) – текстурный, буро-желтовато-коричневый (10YR5/6), структура призматическая, делится на горизонтальные плитки, плотный, глинистый, переход постепенный;

BT2 (79–94 см) – текстурный, коричневато-бурый, немного темнее вышележащего (7,5YR5/8), глинистый, более контрастные железистые пятна и стяжения, среднеплитчатый, пятнистый, ореховато-призматический, очень плотный, липкий.

Почва: агротемногумусовый подбел агротемногумусовый подбел на делювиальных отложениях глинистых сланцев (с закрытой дренажной системой).

Если в естественных вариантах подбелов основными почвообразовательными процессами являются подстилкообразование, гумусово-аккумулятивный процесс, элювиально-глеевый процесс, оглеение (не обязательно) и лессиваж, то в агровариантах этих почв основным профилеобразующим процессом остается лессиваж, антропогенная деятельность, как правило, затрагивает не только поверхностный, но и подповерхностный элювиальный горизонт, формируя пахотный.

Низкая актуальная кислотность пахотных горизонтов (таблица 1), распределение ее по профилю нисходящее, то есть кислотность повышается. Величина потенциальной кислотности повторяет такое распределение. Гидролитическая кислотность увеличивается вниз по профилю, изменяясь в широких пределах. Количество гумуса с глубиной резко уменьшается по элювиально-иллювиальному типу распределения в профиле. Для гранулометрического состава характерно обеднение верхних горизонтов профиля илом при максимальном содержании его в иллювиальных горизонтах.

Таблица 1. Физико-химические показатели агротемногумусовых подбелов.

Гори- зонт, глубина, см	pH		ГК, мэкв 100 г ⁻¹ почвы	ρ г см ⁻³	С, %	ФП, %	Ил, %	NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Грансостав по Качинскому
	H ₂ O	KCl									
Без дренажа											
AP 0-42	6.9	5.9	2,8	2,4	1,9	47	17	21,4	16,8	20,0	Глина легкая
EL 42-71	5.5	4.0	4,8	2,5	0,5	67	14	17,4	0	5,0	Суглинок средний
BT1 71-86	5.3	4.4	14,7	2,4	0,2	35	35	-	-	-	Глина средняя
BT2 86-104	5.7	3.4	13,3	2,5	0,18	29	42	-	-	-	Глина средняя
С дренажной системой											
AP 0-30	6.7	6.0	3,1	2,4	2,5	54	15	16,6	7,8	10,4	Суглинок тяжелый
EL 30-54	5.0	3.6	10,1	2,5	0,2	44	42	17,2	0,01	5,0	Глина легкая
BT1 54-73	5.0	3.5	11,6	2,4	0,3	24	50	-	-	-	Глина средняя
BT2 73-97	5.0	3.5	11,8	2,5	0,2	23	47	-	-	-	Глина средняя

Примечания: ГК – гидролитическая кислотность; ρ плотность твердой фазы; ФП физический песок; «-» - не определялось.

Содержание нитратного азота снижается до текстурного горизонта, второй текстурный горизонт в обоих случаях содержит азота больше, чем пахотный горизонт, значительное перемещение нитрат-ионов можно объяснить явлением "отсеивания солей", поскольку суглинистые почвы с узкими порами действуют как полупроницаемые мембраны, пропуская воду легче, чем соль. Таким образом, нижний иллювиальный горизонт является адсорбционным барьером при миграции нитратного азота. Возможно, на данном участке присутствует и горизонтальная миграция азота удобрений. При отсутствии дренажной системы содержание подвижных форм фосфора почти в два раза выше в верхнем горизонте и в два раза ниже в элювиальном и текстурных горизонтах. Обеспеченность обменным калием высокая в пахотном горизонте также идет дифференциация по элювиально-иллювиальному типу (без дренажа).

Выводы

Агротемногумусовые подбелы, являясь одними из основных типов почв, используемых в пахотном фонде Приморского края, могут быть примером для мониторинговых исследований влияния внесенного биоугля на почвенную систему, интенсивно используемую в сельском хозяйстве.

Благодарности

Исследования были проведены при поддержке гранта РФФИ № 19-29-0516619.

Список литературы

- Angst T.E., Six J., Reay D.S., Sohi S.P. (2014) Impact of pine chip biochar on trace greenhouse gas emissions and soil nutrient dynamics in an annual ryegrass system in California // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. - Vol. 191: 17-26.
- Asai H., Samson B.K., Stephan H.M., Songyikhangsuthor K., Homma K., Kiyono Y., Inoue Y., Shiraiwa T., Horie T. (2009) Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield // *Field Crops Research*. – Vol. 111, 1-2: 81-84.
- Brockhoff S.R., Christians N.E., Killorn R.J., Horton R., Davis D.D. (2010) Physical and Mineral-Nutrition Properties of Sand-Based Turfgrass Root Zones Amended with Biochar // *Agronomy journal*. – Vol. 102: 1627-1631.
- Busscher W., Novak J.M., Dean E., Watts D.W., Niandou M.A.S., Ahmedna M. (2010) Influence of Pecan Biochar on Physical Properties of a Norfolk Loamy Sand // *Soil Science*. – Vol. 175, 1: 10-14.
- Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z., Tan X., Huang X., Zeng G., Zhou L., Zheng B. (2016) Biochar to improve soil fertility. A review // *Agron Sustain Dev* 36, 2: 36 - 36.
- Gurwick N.P., Moore L.A., Kelly C., Elias P. (2013) A systematic review of biochar research, with a focus on its stability in situ and its promise as a climate mitigation strategy // *A systematic review of biochar research*. – Vol. 8, 9: 1 - 9.
- Novak J.M., Lima I., Xing B., Gaskin J.W., Steiner C., Das K.C., Ahmedna M., Rehrah D., Watts D.W., Busscher W.J., Schomberg H. (2009) Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand // *Annals of Environmental Science*. – Vol. 3: 195 - 206.
- Zhang D., Yan M., Niu Y., Liu X., Zwieten L., Chen D., Bian R., Cheng K., Li L., Stephen. Joseph, Zheng J., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Filley T.R., Pan G. (2016) Influence of Pecan Biochar on Physical Properties of a Norfolk Loamy Sand // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – Vol. 226: 25 - 32.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ВНЕСЕНИЯ БИОУГЛЕЙ В ПОЧВЫ

СМИРНОВА Е.В., ГИНИЯТУЛЛИН К.Г., ОКУНЕВ Р.В.

ФГАОУ ВО КФУ, Казань,

elenavsmirnova@mail.ru, ginijatullin@mail.ru, tutinkaz@yandex.ru

Аннотация. Изучена липидная фракция органического вещества (ОВ) различных биоуглей. Показано, что высокотемпературные образцы (400 - 600°C) характеризуются более низким содержанием липидов (от 0,16% до 0,46% к массе биоугля), а низкотемпературные (<400°C) – более высоким содержанием (от 0,54% до 3,38%). Рассчитанные значения $SUVA_{254}$ и Sr спектров поглощения липидной фракции в УФ и видимом диапазоне показывают, что с увеличением температуры пиролиза наблюдается закономерное уменьшение молекулярных масс и степени ароматичности гидрофобных побочных продуктов пиролиза, снижение содержания ПАУ, входящих в липидную фракцию и уменьшение доли высокомолекулярных ПАУ с большим количеством ароматических ядер. Был сделан вывод о необходимости при разработке требований к качеству биоуглей оценивать как общее содержание в них подвижных фракций ОВ, как и качественный состав лабильных составляющих, представляющих потенциальную опасность в аспекте загрязнения почв.

Ключевые слова. Биоуголь. Почва. Липидная фракция. Полиароматические углеводороды.

Введение

Как известно, на состав и свойства биоуглей влияют исходное растительное сырье, скорость, продолжительность и конечная температура пиролиза. В результате, в конечном продукте наряду с формированием инертного углеродистого скелета, образуются в различных количествах побочные продукты. Это могут быть устойчивые к термолизу смолистые вещества, фенольные соединения (Синицын с соавт., 1995), полиароматические углеводороды (ПАУ) (Yan et al., 2004, Wang et al., 2017), гликолипиды, фосфолипиды, гуминоподобные вещества (Kuzuakov et al., 2014), которые, являются потенциально опасными загрязнителями почв. К наиболее опасным составляющим ОВ биоуглей относят ПАУ (Freddo et al., 2012, Keiluweit et al., 2012, Wang et al., 2017), которые являются токсичными соединениями, обладающими канцерогенными свойствами (Abdel-Shafy, 2016). Большая часть подобных продуктов имеет гидрофобную природу, способна переходить в фазу раствора при обработке органическими растворителями и при внесении биоугля в почву будет пополнять состав свободной липидной фракции ее ОВ. Значительная опасность попадания побочных продуктов пиролиза, особенно ПАУ во многом связана с тем, что они являются устойчивыми к деградации почвенной микрофлорой (Kuzuakov et al., 2014, Wang et al., 2017, Okunev et al., 2018). Неконтролируемое внесение низкокачественных биоуглей с высоким содержанием подвижных гидрофобных соединений может привести к существенному загрязнению почв и сопредельных сред и, тем самым, повысить экологические риски использования биоуглей в качестве почвенных мелиорантов.

Цель работы: оценить в биоуглях полученных из различного растительного сырья при разных условиях пиролиза содержание и качественный состав побочных продуктов, входящих в состав липидной фракции в аспекте потенциального загрязнения почвы.

Объекты и методы исследования

Для исследований были использованы биоугли полученные из остатков кукурузы и проса, и древесины ивы при двух режимах пиролиза – низкотемпературном (<400° С) и

высокотемпературном (400-600° C). Экстракцию свободной липидной фракции проводили смесью спирт/бензол (1:1) в аппаратах Сокслета в течение 48 ч. Для спектрометрического изучения в УФ и видимом диапазоне аликвота экстракта выпаривалась под вакуумом. Остаток липидной фракции растворяли в ацетонитриле. ПАУ из биоуглей выделяли смесью ацетон/циклогексан (1:1) в аппаратах Сокслета (Fabbri et al., 2013). Общий углерод в биоуглях определяли сухим сжиганием на приборе vario MICRO cube (Fa Elementar), содержание липидов – гравиметрически, содержание органического углерода в липидной фракции - мокрым сжиганием по методу Тюрина. Измерение спектров поглощения в растворах проводили на двулучевом спектрофотометре Lambda 35 (PerkinElmer, США) в диапазоне 420–240 нм, определение ПАУ - на ВЭЖХ Flexar (Perkin Elmer, США) на колонке Hamilton HxSil C18 упакованной частицами размером 5 мкм. Элюирование проводили при комнатной температуре в линейном градиенте с использованием системы состоящей из воды и ацетонитрила. Скорость потока подвижной фазы составляла 1,5 мл в минуту. Идентификация нафталина, ацетонафтилена, аценафтена проводилась при помощи УФ детектора прибора на длине волны 254 нм, остальные ПАУ идентифицировались на флуоресцентном детекторе (Ex: 260; Em: 420).

Результаты и обсуждение

В таблице 1 показано содержание в биоуглях общего углерода, липидной фракции и углерода липидной фракции. Данные показывают, что увеличение температуры пиролиза приводит к увеличению содержания общего углерода. Наблюдается существенное отличие разно температурных биоуглей по содержанию липидной фракции. Так, образцы, полученные в диапазоне температур от 400 до 600 °С, характеризуются более низким их содержанием (от 0,16% до 0,46% к массе угля), низкотемпературные более высоким содержанием - от 0,54% до 3,38%. С увеличением температуры пиролиза так же наблюдается увеличение содержания углерода липидной фракции. Определенное влияние на содержание гидрофобных продуктов оказывает тип растительного сырья, большее их количество характерно для биоуглей из травянистого материала. Причем данная закономерность прослеживается как для низкотемпературных, так и высокотемпературных образцов.

Таблица 1. Содержание в биоуглях общего углерода, липидной фракции и углерода липидной фракции.

Растительное сырье	Остатки кукурузы	Остатки проса	Ива	Остатки кукурузы	Остатки проса	Ива
Температура пиролиза	<400°С			400-600°С		
Общий углерод $S_{орг}$, % к весу угля	57,2	63,1	77,3	66,3	71,2	79,6
Содержание липидной фракции, % к весу угля	3,38	2,78	0,54	0,46	0,38	0,16
Содержание $S_{орг}$ липидной фракции, % к весу угля	2,10	1,84	0,26	0,31	0,27	0,13
Содержание $S_{орг}$ липидной фракции, % к весу липидов	62,1	66,2	48,1	67,4	71,0	81,3

На рисунке 1. представлены спектры поглощения растворов липидной фракции биоуглей в ацетонитриле в диапазоне длин волн 240-420 нм.

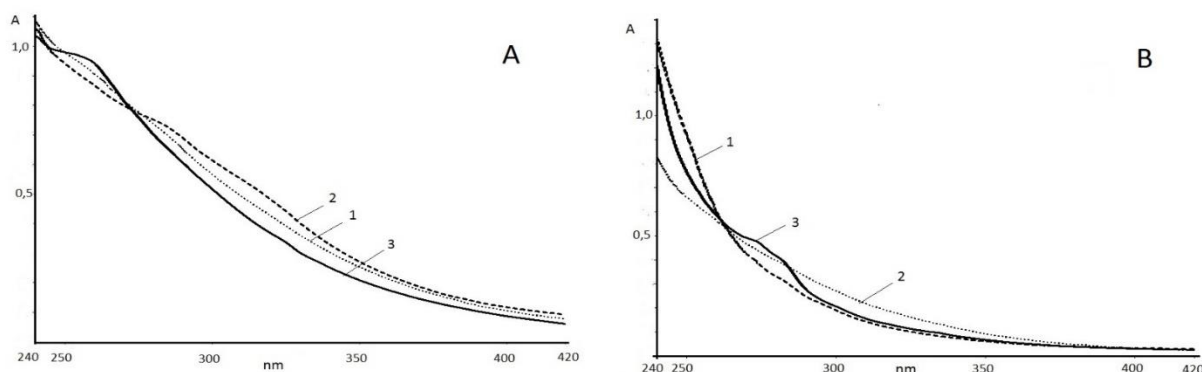


Рис. 1. Спектры поглощения липидной фракции биоуглей: А - низкотемпературные (<400° С), В - высокотемпературные (400°- 600° С) из остатков кукурузы (1), проса (2) и древесины ивы (3).

Спектры поглощения липидной фракции представляют собой непрерывное равномерное увеличение интенсивности поглощения (А) с уменьшением длины волны. Для характеристики такого типа соединений по УФ и видимым спектрам часто используют критерии SUVA и Sr. В исследовании (Weishaar et. al., 2003), было показано, что наиболее специфичным является поглощение при 254 нм, а рассчитанный критерий $SUVA_{254}$ дает сильную корреляцию ($r^2 > 0,97$) с ароматичностью растворенного ОБ, критерий Sr имеет тесную обратную корреляцию с молекулярными массами окрашенных природных растворимых органических соединений (Helms et. al., 2008). Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением температуры пиролиза наблюдается существенное уменьшение степени ароматичности липидной фракции. Так, критерий $SUVA_{254}$ для низкотемпературных биоуглей составлял 5,84 (остатки кукурузы), 6,07 (остатков проса) и 11,0 (древесина ивы), для высокотемпературных – 1,47, 2,81 и 2,8, соответственно. И, если, ароматичность липидной фракции высокотемпературных образцов оценивается приблизительно одинаково, то ароматичность низкотемпературных показывает зависимость от исходного растительного материала. При низкотемпературном пиролизе значения критерия Sr для различных биоуглей изменяется от 0,946 до 1,009, при высокотемпературном - значения увеличиваются до 1,174 - 1,620, что доказывает увеличение доли низкомолекулярных соединений в составе побочных продуктов пиролиза при увеличении температуры.

Суммарное содержание ПАУ во всех биоуглях, полученных при температуре <400°С, в разы превышает их предельное содержание, рекомендованное инициативной группой по биоуглю (IBI, 2013) и составляет 76,45 мг кг⁻¹ (остатки кукурузы), 53,95 мг кг⁻¹ (древесина ивы) и 211,21 мг кг⁻¹ (остатки проса), тогда как во всех высокотемпературных образцах это содержание ниже - 18,32 мг кг⁻¹, 8,61 и 8,49 мг кг⁻¹, соответственно. Так же наблюдается влияние температуры пиролиза на качественный состав входящих в липидную фракцию ПАУ. В целом, степень канцерогенности ПАУ зависит от числа ароматических колец в молекуле, их взаимного расположения и наличия заместителей в молекуле. Наибольшими канцерогенными свойствами обладают ПАУ, которые имеют 4-7 бензольных конденсированных колец (Белицкий Г.А., 2008). Так в низкотемпературных биоуглях из остатков кукурузы содержание двух- и четырех ядерных ПАУ с молекулярным весом менее 228 составляет 97,2%, из остатков проса – 96,3%, из древесины ивы – 77,9%. В высокотемпературных содержание таких ПАУ составляет - 99,1% для биоуглей из

кукурузы и 99,9% для биоуглей из проса и ивы. Следовательно, в низкотемпературных биоуглях содержится существенно большее количество ПАУ и они отличаются более высоким содержанием наиболее опасных высокомолекулярных многоядерных соединений.

Выводы

Таким образом, было показано, что при увеличении температуры пиролиза наблюдается уменьшение общего содержания липидной фракции, а также молекулярных масс и степени ароматичности ее отдельных компонентов. Выявленная тенденция характерна и для ПАУ, входящих в состав липидной фракции биоуглей и представляющих наибольшую опасность для загрязнения почв. Можно сделать вывод, что готовые продукты низкотемпературного пиролиза (< 400°C) содержат в большем количестве ПАУ с высоким содержанием наиболее опасных многоядерных компонентов с выраженным токсичным канцерогенным эффектом. Следовательно, при разработке требований к качеству биоуглей необходимо оценивать не только общее содержание в них подвижных фракций ОВ и ПАУ, но и качественный состав лабильных составляющих ОВ, который во многом определяет потенциальную токсичность биоуглей и экологические риски их использования в качестве почвенных мелиорантов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-04-00869

Список литературы

- Белицкий Г.А. Химический канцерогенез // Вопросы онкологии. – 2008. – Т. 50. – № 6. – С. 166.
- Синицын А.П., Гусаков А.В., Черноглазов В.М. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов. – М.: Моск. гос. ун-т, 1995. – 224 с.
- Abdel-Shafy H. I., Mansour M. S.M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation // Egyptian Journal of Petroleum. 2016. V. 25. I. 1. P/ 107-123 – doi: 10.1016/j.ejpe.2015.03.011
- Fabbri D., Rombolà A.G., Torri C., Spokas K.A. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar and biochar amended soil // Journal of Analytical & Applied Pyrolysis. 2013. V. 103. P. 60-67
- Freddo A., Cai Ch., Reid B.J. Environmental contextualisation of potential toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar // Environ. Pollution. – 2012. – V. 171. – P. 18–24. – doi: 10.1016/j.envpol.2012.07.009.
- Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E., Kieber D.J., Mopper K. Absorption spectral slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnol. Oceanogr. – 2008. – 53(3). – P.955–969.
- IBI, 2013. International Biochar Initiative, Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is used in Soil. http://www.biochar-international.org/sites/default/files/IBI_Biochar_Standards_V1.1.pdf
- Keiluweit M., Kleber M., Sparrow M. A., Simoneit B. R. T., Prah F.G. Solvent-extractable polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar: Influence of Pyrolysis Temperature and Feedstock // Environ. Sci. Technol. – 2012, – V. 46, – P. 9333–9341
- Kuzyakov Y., Bogomolova I., Glaser B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis // Soil Biology and Biochemistry – 2014. – 70. – P. 229-236.

- Okunev R.V, Smirnova E.V, Sharipova A.R, Gilmutdinova, I.M., Giniyatullin, K.G. Investigation of biological destruction of benzo[a]pyrene and polycyclic aromatic hydrocarbons of biochar in soil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2018. - Vol.107, Is.1. - Art. № 012121.
- Wang C., Wang Y., Herath H.M.S.K. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in biochar – Their formation, occurrence and analysis: A review // Organic Geochemistry. 2017. V. 114. P. 1-11.
- Weishaar, J. L., G. R. Aiken, B. A. Bergamaschi, M. S. Fram, R. Fugii, and K. Mopper. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. // Environ. Sci. Technol. 2003. V. 37 P. 4702–4708
- Yan J., You X., Li X., Ni M., Yin X., Cen K. Performance of PAHs emission from bituminous coal combustion // J. of Zhejiang University. 2004. V. 5. P. 1554–1564.

ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISKS OF BIOCHAR APPLICATION TO SOILS

SMIRNOVA E.V., GINIYATULLIN K.G., OKUNEV R.V.

Kazan Federal University, Kazan

elenavsmirnova@mail.ru, ginijatullin@mail.ru, tutinkaz@yandex.ru

Abstract. The lipid fraction of organic matter (OM) of different biochars was studied. It has been shown that high-temperature biochars (400 - 600°C) are characterized by lower lipid content (from 0.16% to 0.46% by weight of biochar), while low-temperature biochars (< 400°C) – by higher lipid content (from 0.54% to 3.38%). The calculated values of SUVA₂₅₄ and *Sr* of the absorption spectra of the lipid fraction in the UV and in the visible range have shown that with an increase in the pyrolysis temperature there was (1) a decrease in the molecular weight and degree of aromaticity of hydrophobic pyrolysis byproducts, (2) a decrease in the content of PAHs included in the lipid fraction, and (3) a decrease in the proportion of high-molecular PAHs with a large amount of aromatic kernels. It was concluded that when developing requirements for the quality of biochars, it is necessary to evaluate both the total content of mobile fractions of OM in biochars, as well as the qualitative composition of labile components that pose a potential hazard in terms of soil pollution.

Keywords. Biochar. Soil. Lipid fraction. Polyaromatic hydrocarbons.

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОДВИЖНОСТЬ В ПОЧВАХ ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ КАДМИЯ, СВИНЦА И УРАНА

СОКОЛИК Г.А., ОВСЯННИКОВА С.В., ПОПЕНЯ М.В.

БГУ, Минск

sokolikga@mail.ru

Аннотация. Методом химического фракционирования изучено изменение содержания Cd, Pb и U в обменных (обратимо сорбированных) и подвижных (условно биологически доступных) формах в песчаной и супесчаной почвах дерново-подзолистого типа после добавления 1–5 мас. % биоугля. Установлено, что к заметному снижению запаса Cd, Pb и U в формах, определяющих их подвижность и биологическую доступность растениям, при сохранении благоприятных условий для выращивания сельскохозяйственных растений может приводить внесение в супесчаные почвы биоугля в дозе 3 мас. %, а в песчаные – 3 5 мас. %.

Ключевые слова. Кадмий. Свинец. Уран. Формы тяжелых металлов в почве. Влияние биоугля.

Введение

Биоуголь привлекает внимание исследователей как один из перспективных видов веществ, способных повышать качество почв сельскохозяйственного назначения. Благодаря высокой пористости биоуголь улучшает структуру почв, изменяя ее объемную плотность, распределение пор и размер почвенных агрегатов. Кроме того, он задерживает в почве влагу и предотвращает вымывание удобрений, способствует накоплению элементов питания в формах, доступных для корневых систем растений. Биохимические и микробиологические процессы, протекающие в присутствии биоугля, обеспечивают формирование в почве условий, способствующих усвоению растениями питательных веществ и повышению урожайности растительных культур. Внесение биоугля в почву сокращает выбросы в окружающую среду закиси азота и метана и обеспечивает долговременное изъятие значительной части углерода из обменного резервуара (LeCroy et al., 2013; Sohi et al., 2010; Xua et al., 2013).

Несмотря на многие положительные эффекты до сих пор не ясно, как внесение биоугля в почву влияет на физико-химическое состояние, миграционную способность и биологическую доступность присутствующих в почве тяжелых металлов (ТМ) и радионуклидов естественного и техногенного происхождения.

Цель исследования – установить характер и степень изменения содержания кадмия, свинца и урана в обменных и подвижных (условно биологически доступных) формах в результате внесения в почвы 1-5 мас. % биоугля в различные сроки после его внесения.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись образцы (0–20)-см слоев песчаных и супесчаных почв дерново-подзолистого типа и биоуголь из отходов древесины дуба, ясеня, граба и березы.

Образцы почв были отобраны в Браславском районе Витебской области. Почвы были просеяны через сито с диаметром отверстий 2 мм, а биоуголь измельчен на шаровой мельнице до порошкообразного состояния. Эксперименты проводили в лабораторных условиях с образцами почв, содержащими природный уран и искусственно обогащенными Cd и Pb до

уровней 5 и 120 мг кг⁻¹ соответственно. После добавления водных растворов солей Cd и Pb почвенные образцы выдерживали в течение месяца при температуре (18 ± 2) °С и влажности (70 ± 5)%. Через месяц в исследуемые почвы вносили биоуголь. Образцы почв с добавками биоугля и контрольные образцы без биоугля выдерживали в одинаковых условиях в течение заданного времени. Влажность почвенных образцов контролировали по их массе, в случае необходимости почвы дополнительно увлажняли.

Содержание в почвах элементов питания растений (К, Са) и ТМ (Cd, Pb, U) в обменных формах устанавливали по результатам их экстрагирования из почвенных проб раствором ацетата аммония (1 моль дм⁻³) при рН, соответствующих рНКCl почвенной среды, а в подвижных (условно биологически доступных) формах – раствором ацетатного буфера при рН 4,6. Содержание Cd, Pb, К, Са в анализируемых пробах определяли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием спектрометра ZEEnit 700. Для перевода исследуемого вещества в атомно-дисперсное состояние использовали пламя смеси ацетилен-воздух. Содержание урана в пробах оценивали посредством радиохимического анализа с альфа-спектрометрической идентификацией радионуклидов спектрометром SOLOIST U0450 фирмы EG&G ORTEC, оснащенный детекторами 576 A-600 RV.

Результаты и обсуждение

Установленные характеристики взятых для исследования образцов почв и биоугля приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики образцов почв и биоугля

ОК _п , %	ПВ _п , %	рН _{КCl}	[Ca _{обм}], мг кг ⁻¹	[K _{обм}], мг кг ⁻¹	[Cd], мг кг ⁻¹	[Pb], мг кг ⁻¹	A _u , Бк кг ⁻¹
Песчаная почва (ДПП)							
2,00±0,18	36,6±1,5	4,63±0,02	352±11	43,4±1,9	0,32±0,04	2,94±0,22	8,86±0,16
Супесчаная почва (ДПСп)							
3,47±0,24	40,2±1,1	5,79±0,10	1 406±27	215,9±7,3	0,37±0,04	5,94±0,30	11,50±0,40
Биоуголь							
ОК, %	ПВ, %	рН _{КCl}	[Ca], мг кг ⁻¹	[K], мг кг ⁻¹	[Cd], мг кг ⁻¹	[Pb], мг кг ⁻¹	A _u , Бк кг ⁻¹
97,4±0,6	305±7	8,50±0,05	2 830±90	2 851±34	0,095±0,001	0,286±0,003	0,17±0,03

Примечание: ОК_п и ОК – общее содержание органических компонентов в образцах почвы и биоугля, % от массы абсолютно сухого вещества; ПВ – полная влагоемкость образца, % от массы абсолютно сухого вещества; рН_{КCl} – рН суспензии анализируемого образца в растворе 1 моль/дм³ KCl; [Me] и [Me_{обм}] – общее содержание соответствующего металла и металла в обменной форме в расчете на абсолютно сухое вещество.

Установлено, что изученная песчаная почва по относительному содержанию Cd_{обм}, Pb_{обм} и U_{обм} (73; 54; 2,9%) превосходила супесчаную почву (29; 7,2; 0,7%), что могло быть связано с более высокой сорбционной способностью супесчаной почвы и более высокой кислотностью песчаной почвы. Рассматриваемые почвы отличались и по содержанию Cd, Pb и U в подвижных формах, но менее существенно по сравнению с их содержанием в обменных формах. В песчаной почве содержание Cd_{подв}, Pb_{подв} и U_{подв} составляло 74, 54 и 3,1%, а в супесчаной – 64; 38 и 3,9% от общего содержания соответствующего элемента в почве. Практически одинаковое содержание в песчаной почве ТМ в обменных и подвижных формах, скорее всего, было связано с близкими условиями извлечения элементов в этих формах из-за

сходного химического состава и совпадения pH экстрагирующих растворов (4,6), обусловленного соответствующей кислотностью почвенной среды (pH_{KCl} 4,6).

Полученные данные хорошо согласуются с результатами определения $Cd_{подв}$ и $Pb_{подв}$ в регионах с высокими уровнями техногенного загрязнения почвенного покрова (Houben et al., 2013).

Изменение в почвах запаса Cd , Pb и U в подвижных формах. Приняв содержание каждого из ТМ в подвижной (условно биологически доступной) форме в контрольных образцах почвы без добавления биоугля за 100%, можно проследить, как изменяется относительный запас элементов в этой форме в разные сроки после внесения различных доз биоугля. Соответствующие данные для супесчаной почвы приведены на рис 1.

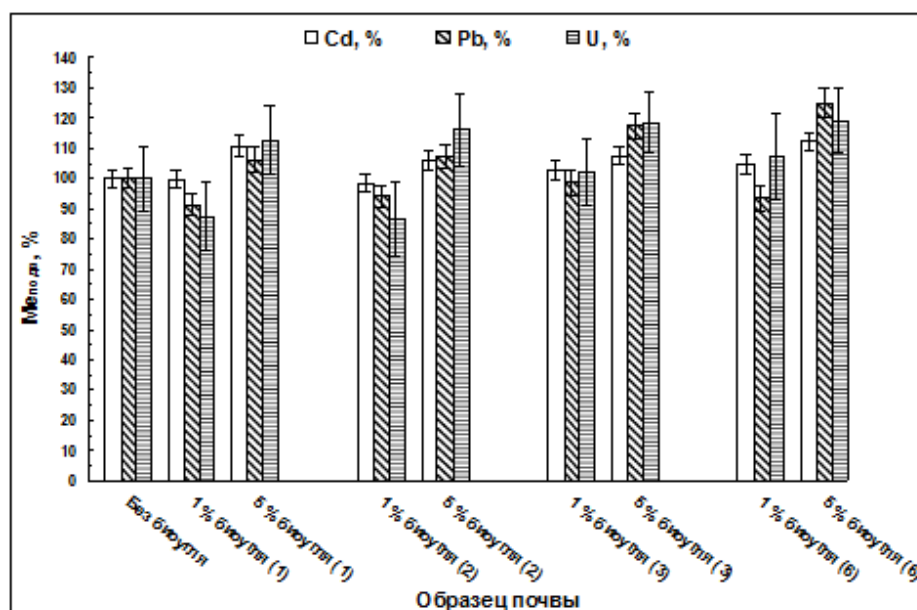


Рис. 1. Изменение запаса Cd , Pb и U в подвижной форме ($Me_{подв}$, %) в результате внесения биоугля в супесчаную почву через 1 (1), 2 (2), 3 (3) и (6) 6 месяцев после его внесения.

Из полученных данных следует, что в течение всего периода наблюдения (6 месяцев) существенных изменений в содержании $Cd_{подв}$ после внесения в образцы супесчаной почвы 1 и 5 мас. % биоугля не обнаружено. После добавления 1 мас. % биоугля содержание $Cd_{подв}$ в почве практически не изменилось, а после внесения 5 мас. % увеличилось не более чем на 12% по сравнению с контролем.

Содержание $Pb_{подв}$ в супесчаной почве через месяц после добавления 1 мас. % биоугля сократилось на 9%, а на последующих этапах эксперимента уменьшалось на 2–6% по сравнению с контрольными образцами. После внесения в образцы почвы 5 мас. % биоугля содержание $Pb_{подв}$ увеличилось по сравнению с контрольными почвенными образцами: на 6% – через месяц, на 7 – через 2, на 18 – через 3 и на 25% – через 6 месяцев.

Изменение содержания $U_{подв}$ в супесчаной почве даже через 6 месяцев после внесения 5 мас. % биоугля не превышало неопределенности полученного результата.

В песчаной почве содержание $Cd_{подв}$ и $Pb_{подв}$ в подвижной форме через 1–3 месяца после добавления 1 мас. % биоугля практически не изменилось по сравнению с контрольными образцами, а после внесения 5 мас. % биоугля уменьшилось на 7–14%, при этом запас $U_{подв}$ сократился примерно на 50%.

Изменение в почвах запаса Cd, Pb и U в обменных формах. В ходе исследования было показано, что добавка 1 мас. % биоугля слабо влияла на содержание $Cd_{\text{подв}}$ и $U_{\text{подв}}$, а добавка 5 мас. % привела к заметному (до 25%) увеличению содержания $Cd_{\text{подв}}$ в супесчаной почве. Поэтому для изучения влияния биоугля на содержание в почвах Cd, Pb и U в обменных формах ($Me_{\text{обм}}$) была выбрана промежуточная доза биоугля 3 мас. %. Приняв содержание каждого из ТМ в обменной форме в контрольных образцах почвы без добавления биоугля за 100%, рассмотрим, как менялось содержание элементов в этой форме относительно их содержания в соответствующих контрольных образцах в разные сроки после внесения 3 мас. % биоугля. Экспериментальные данные по изменению содержания $Cd_{\text{обм}}$, $Pb_{\text{обм}}$ и $U_{\text{обм}}$ от 1 до 6 месяцев после внесения этой дозы биоугля в образцы песчаной и супесчаной почв приведены на рис. 2.

Из полученных данных следует, что в течение 6 месяцев после внесения биоугля в почвы содержание $Me_{\text{обм}}$ в песчаной почве было ниже, чем в контрольных почвенных образцах: $Cd_{\text{обм}}$ – на 35–38%, $Pb_{\text{обм}}$ – 42–44% и $U_{\text{обм}}$ – 49–53, а в супесчаной почве – соответственно на 20–26, 30–35 и 15–19%. Минимальное содержание этих тяжелых металлов в обменных формах наблюдалось через 2 месяца после внесения биоугля.

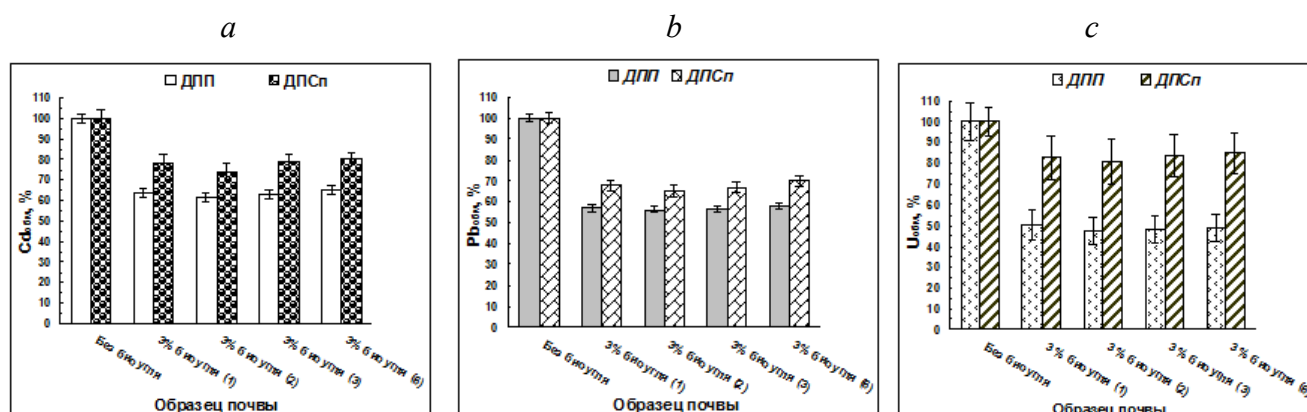


Рис. 2. Изменение запаса ТМ в обменной форме ($Me_{\text{обм}}$, %) в песчаной (ДПП) и супесчаной (ДПСп) почвах через 1 (1), 2 (2), 3 (3) и (6) 6 месяцев после добавления 3 мас. % биоугля:
а – $Cd_{\text{обм}}$; б – $Pb_{\text{обм}}$; с – $U_{\text{обм}}$.

Таким образом, под влиянием 3 мас. % биоугля в образцах песчаной и супесчаной почв заметно сократилось содержание $Cd_{\text{обм}}$, $Pb_{\text{обм}}$ и $U_{\text{обм}}$. Эффект отчетливо проявился через месяц после внесения биоугля в почвы, достиг максимального уровня через 2 месяца после внесения и сохранялся примерно на тех же уровнях на протяжении последующих 4 месяцев. При этом в песчаной почве эффект проявился в большей степени, чем в супесчаной, что может быть связано с более существенным снижением под влиянием биоугля кислотности песчаной почвы. Через месяц после добавления биоугля показатель pH_{KCl} в песчаной почве составлял 5,7 по сравнению с 5,0 в контрольных образцах, а в супесчаной почве – 6,8 по сравнению с 6,5 в контрольных почвенных образцах. Через 2 месяца после внесения биоугля в почвы величины показателей pH_{KCl} практически не изменились по сравнению с соответствующими показателями контрольных образцов почв.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено:

- 1) в песчаной и супесчаной почвах дерново-подзолистого типа относительные количества ТМ и в обменной, и в подвижной форме соотносятся следующим образом: $Cd > Pb \gg U$;
- 2) в течение 6 месяцев наблюдения существенных изменений в содержании $Cd_{подв}$ и $U_{подв}$ после внесения в супесчаную почву 1 мас. % биоугля не обнаружено;
- 3) при дозе биоугля 5 мас. % содержание $Cd_{подв}$, $Pb_{подв}$ и $U_{подв}$ в песчаной почве уменьшилось, а в супесчаной – $Cd_{подв}$ и $Pb_{подв}$ увеличилось, изменений же в содержании $U_{подв}$ не выявлено;
- 4) внесение 3 мас. % биоугля в песчаную и супесчаную почвы дерново-подзолистого типа способствовало снижению содержания $Cd_{обм}$, $Pb_{обм}$ и $U_{обм}$, причем в песчаной почве в большей степени, чем в супесчаной;
- 5) при сохранении благоприятных условий для выращивания сельскохозяйственных растений к заметному снижению запаса $Cd_{обм}$, $Pb_{обм}$ и $U_{обм}$ может приводить внесение в супесчаные почвы дерново-подзолистого типа ($pH_{KCl} 5,8 \div 6,6$) 3 мас. % биоугля, а в кислые песчаные ($pH_{KCl} 4,6 \div 5,5$) – 3–5 мас. %.

Список литературы

- Houben D., L. Evrard and P. Sonnet (2013) Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar // *Chemosphere*. Vol. 92, 11: 1450–1457.
- LeCroya C., C.A. Masiello, J.A. Rudgers, W C. Hockaday and J.J. Silberg (2013) Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface // *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 58: 248–254.
- Sohi S., E. Krull, E. Lopez-Capel and R. Bol (2010) A review of biochar and its use and function in soil // *Adv. Agron*. Vol. 105: 47–82.
- Xua G., L.L. Weia, J.N. Suna and S.X. Changa (2013) What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? // *Ecological Engineering*. Vol. 52: 119–124.

INFLUENCE OF BIOCHAR ON CADMIUM, LEAD AND URANIUM FORMS DETERMINING THEIR MOBILITY IN SOILS

SOKOLIK G.A., OVSIANNIKOVA S.V., PAPENIA M.V.

Belarusian State University, Minsk, Belarus
sokolikga@mail.ru

Abstract. Using the method of chemical fractionation the effect of 1–5 w. % of biochar application in sandy and sandy loam sod podzol soils on the Cd, Pb and U reserves in exchangeable (sorbed reversibly) and mobile (conditionally bioavailable) forms has been investigated. It was found that in favorable conditions for growing of agricultural plants an essential decrease of Cd, Pb and U reserves in forms determining their mobility and availability in sandy soils could be caused with application of 3–5 w. % of biochar, but in sandy-loam soils it can be reached with 3 w. % of biochar.

Keywords. Cadmium. Lead. Uranium. Forms of heavy metals in soil. Effect of biochar.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БИОУГЛЯ НА КОМПЛЕКС ПОЧВЕННЫХ ГРИБОВ АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ МЕТОДАМИ МЕТАГЕНОМНОГО АНАЛИЗА И ПОСЕВА НА ПИТАТЕЛЬНУЮ СРЕДУ

ШАХНАЗАРОВА В.Ю.^{1,2}, КИЧКО А.А.², АКСЕНОВА Т.С.², ОРЛОВА Н.Е.¹, ОРЛОВА Е.Е.¹

¹- ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² – ФГБНУ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, 196608 Россия, г. Санкт-Петербург - Пушкин

shahnazarova-v@mail.ru; norlova48@mail.ru; orlova55@mail.ru

Аннотация. Изменения в составе почвенной микобиоты были обнаружены при ее исследовании как методами метагеномики, так и при посеве микромицетов на питательную среду. Оба метода показали возрастание обилия *Zygomycota* в почве с биоуглем. Комплекс высеваемых грибов при внесении биоугля меняется кардинально, в то время как исследование микобиоты методом метагеномного анализа показало не столь существенные изменения в таксономическом составе почвенных грибов.

Ключевые слова. Почвенная микобиота. Биоуголь. Агродерново-подзолистая почва. *Ascomycota*. *Zygomycota*. *Umbelopsis*. Питательная среда Чапека. Метагеномный анализ. Высокопроизводительное секвенирование.

Введение

Вопрос о влиянии биоугля на почвенную биоту в настоящее время активно изучается (Lehmann et al, 2011), в том числе и методом метагеномного анализа. К сожалению, чаще объектом исследования становятся прокариоты (бактерии и археи) и реже исследуются грибы, в то время как микобиота является активным участником многих почвенных процессов. Тем не менее исследований, в которых изучалось воздействие внесения в почву биоугля на разнообразие не только на прокариот, но и грибов, крайне мало (Abujabbar et al, 2016, Chen et al, 2018, Gao et al, 2017). В дерново-подзолистых почвах изменения микобиоты при внесении биоугля не изучены, хотя именно в этих почвах вклад грибов в почвенные процессы особенно велик (Мирчинк, 1982).

Цель данной работы – оценить изменения микобиоты дерново-подзолистой почвы, произошедшие при ее краткосрочном (7 суток) и длительном (90 суток) компостировании с биоуглем.

Объекты и методы исследования

Влияние внесения биоугля на почвенную микобиоту изучалось в агродерново-подзолистой супесчаной почве с высоким содержанием гумуса, отобранной в Гатчинском районе Ленинградской области (Меньково). Характеристики почвы: рН_{H2O} 6,7, содержание гумуса 4,45%, содержание общего азота 0,22%. В почву вносился биоуголь (1%), полученный быстрым пиролизом (t=550°C) из древесины березы и осины. Подробная характеристика почвы и биоугля приведена ранее (Orlova et al., 2018). Исследования проводились в инкубационном эксперименте, образцы почвы для анализа отбирали на 7 и 90-е сутки инкубирования.

Для определения таксономического состава грибов из почвы с помощью набора NucleoSpin Soil (MACHERY-NAGEL) была выделена ДНК, после чего полученный препарат был использован как матрица в реакции ПЦР с универсальными праймерами на участок межгенного спейсера

рибосомального оперона ITS2 (*its3* - GCATCGATGAAGAACGCAGC / *its4* - TCCTCCGCTTATTGATATGC), амплифицированные и секвенированные (Illumina MiSeq, reagent kit v3) последовательности были обработаны и идентифицированы с помощью пакета *pipits* и базы данных UNITE (Nilsson et al, 2018). Численность и разнообразие высеваемых микромицетов определялось методом посева из почвенных разведений на среду Чапека. Идентификацию выделенных чистых культур грибов проводили как на основании морфологических признаков с использованием определителей (Barnett H.L., Hunter B.B, 1987, Пидопличко, 1972, Meyer W. ,Gams, 2003 и др.), так и методом секвенирования по Сенгеру. Выделение геномной ДНК чистых культур грибов проводилось по стандартной методике (González-Mendoza et al, 2010). Выделенная ДНК была использована для амплификации и секвенирования рибосомального оперона с использованием праймеров ITS1 и ITS4 (White, 1990). Секвенирование выполнялось на приборе 3500xL Genetic Analyzer (Applied Biosystems™), согласно рекомендациям производителя. Нуклеотидные последовательности, полученные в результате секвенирования, были идентифицированы с помощью веб-интерфейса программы BLAST (Zhang et al, 2000).

Результаты и обсуждение

Метагеномный анализ показал, что царство грибов в данной почве было представлено в основном аскомицетами (рис. 1). Внесение биоугля приводило к быстрому возрастанию обилия базидиомицетов, однако после трехмесячной инкубации разница между вариантами по этому показателю сглаживалась. Также после трехмесячной инкубации в почве с биоуглем по сравнению с почвой без его внесения возрастало обилие зигомицетов и снижалось обилие хитродииомицетов.

Аскомицеты были представлены в основном грибами класса *Sordariomycetes* (57-75%), в меньшей степени *Eurotiomycetes* (5-9%) и *Dothideomycetes* (0.6-3.8%), обилие этих классов слабо зависило от присутствия в почве биоугля. В почве контрольного варианта встречались представители класса *Saccharomycetes* (1,7%), но в почве других трех вариантов они не обнаруживались.

Базидиомицеты были представлены в основном классом *Agaricomycetes*. Его обилие после внесения биоугля резко возрастало. Напротив, после трехмесячной инкубации, обилие этого класса снижалось по сравнению с контролем. Вторым по представленности классом базидиомицетов был *Tremellomycetes*, его обилие в почве с биоуглем было выше, чем в контроле, в оба срока наблюдения.

Обилие наиболее представленных (более 1%) порядков грибов, выявленных с помощью метагеномного подхода, приведено на теплокарте (таб.1).

Таксономический состав высеваемых грибов в первые дни после внесения биоугля менялся незначительно. Спустя 7 суток после начала инкубации как в контроле, так и в почве с биоуглем доминировал род *Penicillium* (рис. 1), представленный в основном видом *Penicillium jensenii*. В варианте «биоуголь, 7 суток» по сравнению с контролем несколько снижалась представленность редких видов, но часто встречающиеся виды - *Penicillium janthinellum*, *Umbelopsis ramanniana* – в этих вариантах одни и те же.

Через 90 дней инкубации в почве контрольного варианта по-прежнему преобладали грибы рода *Penicillium* (рис. 1), но возрастало и обилие *Zygomycota*, представленного родами *Mucor*, *Rhizopus* и *Umbelopsis*. А в почве с биоуглем за этот период произошла кардинальная перестройка структуры сообщества микромицетов: в ней доминировал род *Umbelopsis*, представленный одним видом *Umbelopsis ramanniana*. Возрастало обилие грибов родов *Gliocladium*, *Rhizopus*, в меньшей степени – *Aspergillus*, *Humicola*, *Fusarium*.

Таким образом, если в почве контрольного варианта среди высеваемых микромицетов доминировали *Ascomycota*, в длительно инкубированной с биоуглем почве преобладали *Zygomycota*, представленные главным образом родом *Umbelopsis*, что в целом для дерново-подзолистых почв не характерно (Мирчинк, 1982).

Как метагеномный анализ, так и метод посева показал, что внесение в почву биоугля привело к возрастанию представленности в ней грибов отдела *Zygomycota*. Этот эффект от внесения биоугля отмечали и другие авторы (Abujabbeh et al, 2016; Gao et al, 2017). Однако мы отметили, что выраженность изменений при разных методах исследования различна: если метагеномный анализ показал лишь небольшое возрастание обилия *Zygomycota* при длительном компостировании почвы с биоуглем, то среди высеваемых грибов представители этого отдела в данном варианте преобладали. Таким образом, высеваемые грибы реагировали на внесение в почву биоугля гораздо сильнее, чем сообщество почвенных грибов в целом (рис. 1, 2). Вероятно, это объясняется тем, что на использованной питательной среде растут копитрофные грибы, потребляющие в основном легкодоступное органическое вещество (сахара). Возможно, сорбция на частичках биоугля органического вещества более значима для быстрорастущих микромицетов-копитрофов, чем для более специализированных гидролитиков растительных полимеров, не растущих на использованной питательной среде.

Таблица 1. Теплокарта обилия порядков грибов в почве с внесением и без внесения биоугля (по метагеномным данным).

	почва, 7 сут	почва + 1% биоуголь, 7 сут	почва, 90 сут	почва + 1% биоуголь, 90 сут
	%			
Pleosporales	0.4%	2.4%	3.5%	0.9%
Eurotiales	8.8%	3.0%	3.7%	4.1%
Onygenales	0.3%	3.9%	1.4%	0.5%
Helotiales	0.1%	4.2%	2.5%	4.2%
Thelebolales	0.0%	4.6%	4.2%	5.1%
Saccharomycetales	1.7%	0.0%	0.0%	0.0%
Coniochaetales	0.0%	1.0%	0.2%	1.0%
Hypocreales	2.6%	17.3%	20.5%	29.8%
Sordariales	20.5%	33.3%	36.5%	24.9%
Agaricales	0.0%	3.9%	2.0%	1.0%
Cantharellales	0.0%	0.8%	5.9%	0.0%
Polyporales	0.0%	1.3%	1.7%	0.6%
Mortierellales	0.0%	0.7%	0.6%	3.0%
Mucorales	0.2%	0.6%	0.1%	1.6%

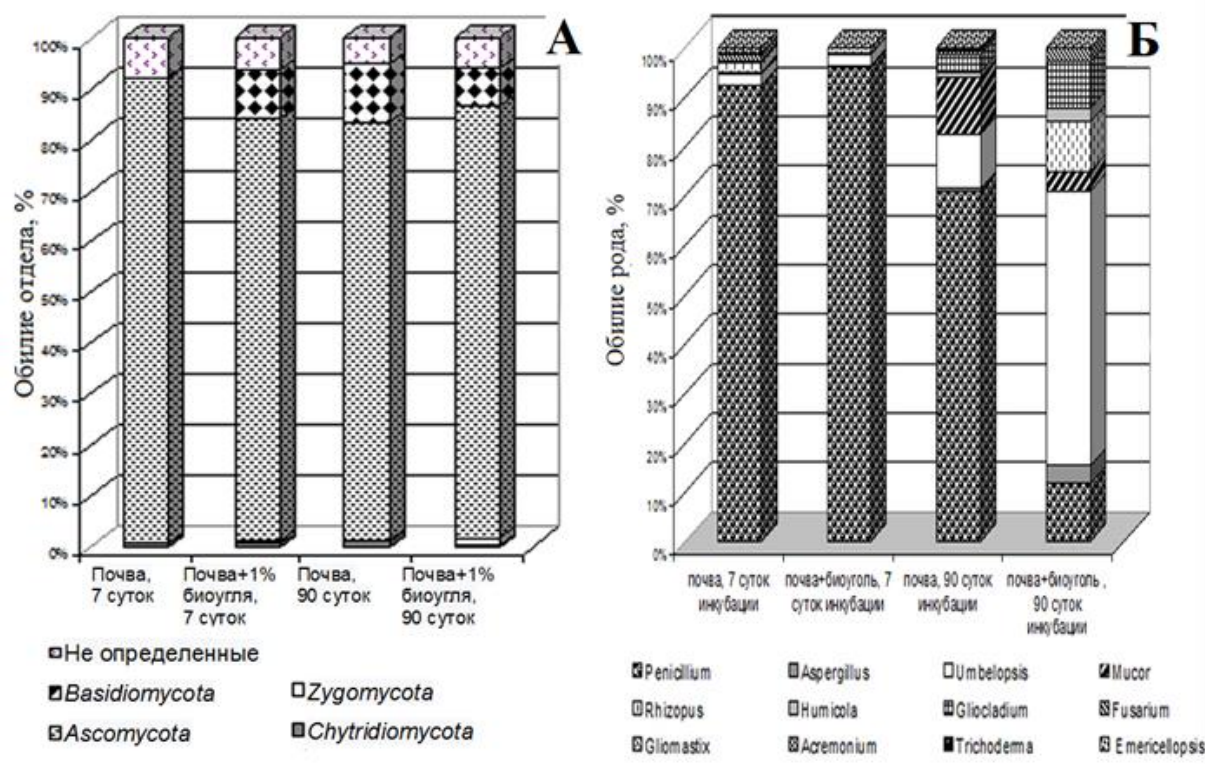


Рис. 1. Влияние внесения биоугля на таксономический состав почвенных грибов при разных сроках инкубации (А - по метагеномным данным, обилие отделов, Б – по результатам посева на среду Чапека, обилие родов).

Выводы

1. Длительная (90 с) инкубация агродерново-подзолистой почвы с биоуглем привела к возрастанию обилия в ней грибов отдела *Zygomycota*, что было показано как с помощью метагеномного анализа, так и методом посева на питательную среду.
2. В сообществе высеваемых грибов при длительном компостировании почвы с биоуглем сменялся доминирующий вид: если в контроле это был *Penicillium jensenii*, то в почве с биоуглем - *Umbelopsis ramanniana*.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-016-00208а. Метагеномный анализ проводился с использованием оборудования ЦКП «Геномные технологии, протеомика и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ.

Список литературы

- Мирчинк Т.Г. (1988) Почвенная микология. Изд-во МГУ. М. 220 с.
 Пидопличко Н.М. (1972) Пеницилли. «Наукова думка», Киев, 149 с.
 Abujabhah I.S., Bound S.A., Doyle R., Bowman J.P. (2016) Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil// Applied Soil Ecology. Vol. 98: 243-253
 Barnett H.L., Hunter B.B. (1987) Illustrated genera of imperfect fungi. Macmillan publishing company. London-New York. 218 p.
 Chen J., Sun X., Zheng J., Zhang X., Liu X., Bian R., Li L., Cheng K., Zheng J., Pan G. (2018) Biochar amendment changes temperature sensitivity of soil respiration and composition of microbial

- communities 3 years after incorporation in an organic carbon-poor dry cropland soil// *Biology and Fertility of Soils*. Vol. 54: 175–188
- Gao L., Rui W., Shen G., Zhang J., Meng G., Zhang J. (2017) Effects of biochar on nutrients and the microbial community structure of tobacco-planting soils // *J. of Soil Science and Plant Nutrition*. Vol. 17, 4: 884–896.
- González-Mendoza D, Argumedo-Delira R, Morales-Trejo A, Pulido-Herrera A, Cervantes-Díaz L, Grimaldo-Juarez O, Alarcón A. (2010) A rapid method for isolation of total DNA from pathogenic filamentous plant fungi // *Genetics and Molecular Research*. 9(1):162–6.
- Gweon H.S., Oliver A., Taylor J., Booth T., Gibbs M., Read D. S., Griffiths R.I., Schonrogge K. (2015) PIPITS: an automated pipeline for analyses of fungal internal transcribed spacer sequences from the Illumina sequencing platform // *Methods in Ecology and Evolution*. 6(8): 973–980.
- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D. (2011) Biochar effects on soil biota - A review// *Soil Biology & Biochemistry*, 43: 1812–1836.
- Meyer W., Gams W. (2003) Delimitation of Umbelopsis (Mucorales, Umbelopsidaceae fam. nov.) based on ITS sequence and RFLP data // *Mycological Research*. 107 (3): 339–350.
- Nilsson RH, Larsson K-H, Taylor AFS, Bengtsson-Palme J, Jeppesen TS, Schigel D, Kennedy P, Picard K, Glöckner FO, Tedersoo L, Saar I, Kõljalg U, Abarenkov K. (2018) The UNITE database for molecular identification of fungi: handling dark taxa and parallel taxonomic classifications // *Nucleic Acids Research* 46(1): D259–D264.
- Orlova N., Abakumov E., Orlova E., Yakkonen K., Shahnazarova V. (2019) Soil organic matter alteration under biochar amendment practice: study on the Podzol soils of the Leningrad region (Russia). *J. Soils and Sediments*, 1: 1–9.
- White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor J (1990) Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: *PCR Protocols: a guide to methods and applications*. (Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ eds). Academic Press, New York, USA: 315–322.
- Zhang Z., Schwartz S., Wagner L., & Miller W. (2000) A greedy algorithm for aligning DNA sequences // *Journal of Computational Biology*. 7(1–2):203–14.

THE STUDY OF THE BIOCHAR IMPACT ON AGRO SODDY-PODZOLIC SOIL FUNGI COMPLEX BY METAGENOMIC ANALYSIS AND SEEDING ON THE NUTRIENT MEDIUM

SHAHNAZAROVA V.Yu.^{1,2}, KICHKO A.A.², AKSENOVA A.A.², ORLOVA N.E.¹, ORLOVA E.E.¹

¹ Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Russia
shahnazarova-v@mail.ru

Abstract. Changes in the composition of the soil microbiota were detected both by metagenomic methods and by seeding micromycetes on the nutrient medium. Both methods showed an increase in the abundance of Zygomycota in the soil under biochar. The complex of seeded on the nutrient medium fungi changed radically after biochar application, while the changes in the soil fungi taxonomic composition studied by metagenomics methods were not so significant.

Keywords. Soil mycobiota. Biochar. Agro soddy-podzolic soil. Ascomycota. Zygomycota. Umbelopsis. Chapek nutrient medium. Metagenomic analysis. High-performance sequencing.

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs ЛИСТОВОЙ СВЕКЛОЙ, ВЫРАЩЕННОЙ НА ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЧВАХ

ШУРАНКОВА О.А., НИКИТИН А.Н., КЛИНИЧЕНКО С.А.

*ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», Гомель, Беларусь
shurankova@list.ru, nikitinale@gmail.com, s-a-k@list.ru*

Аннотация. Используемые в настоящее время методы минимизации поступления техногенных долгоживущих радионуклидов в продукцию растениеводства основаны преимущественно на использовании химических средств мелиорации. Это исключает возможность ведения органического сельского хозяйства на загрязненных почвах. Для поиска совместимых с принципами органического земледелия методов ведения хозяйства на территориях, загрязненных радионуклидами, выполнено испытание почвоулучшающих добавок на основе биоугля в качестве средства для снижения корневого поступления ^{137}Cs в растения. Показано положительное влияние биоугля на агрохимические показатели почвы. Его внесение в супесчаные и торфяные почвы в дозе 1–5 мас.% уменьшает их кислотность, повышает емкость поглощения, содержание доступного кальция и калия, увеличивает влагоемкость. Подобрана оптимальная доза биоугля для снижения перехода ^{137}Cs из почвы в листовую свеклу – 1 мас.%.

Ключевые слова. Биоуголь. Торфяная почва. Цезий-137. Листовая свекла.

Введение

Биоуголь обладает набором характеристик, делающих этот материал ценным почвенным мелиорантом. Для него характерна большая площадь свободной поверхности на единицу массы и объема и высокая сорбционная способность. Кроме того, он содержит значительные количества калия, который постепенно высвобождается в почвенной среде. Данный факт позволил нам выдвинуть гипотезу, что внесение биоугля в почву позволит не только повысить ее плодородие за счет улучшения водно-физических и агрохимических свойств, но снизить накопление в продукции сельского хозяйства таких поллютантов, как тяжелые металлы и техногенные радионуклиды.

Объекты и методы исследования

Для проведения эксперимента использовалась торфяная почва, загрязненная ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС; биоуголь из древесины твердолиственных пород. Внесение биоугля проводилось в концентрации 1 и 3% от общей массы почвенной смеси. Эксперимент проводился в пятикратной повторности. Пластиковые ёмкости наполнили почвой (по 860 г на сосуд). В каждый сосуд высаживали по 16 семян листовой свеклы (мангольда) на глубину 2 см. На 65-й день после посадки растения срезали, взвешивали сырую массу, подсчитали количество растений и отправили на измерение удельной активности по ^{137}Cs , предварительно высушив до воздушно-сухого состояния.

Определение агрохимических показателей в почвенных образцах проводилось по стандартным методикам: pH (ГОСТ 26483-85), гидролитическая кислотность (ГОСТ 26212-91), сумма поглощенных оснований (ГОСТ 27821-88), гумус (ГОСТ 26213-91), обменный кальций и магний (ГОСТ 26487-85), подвижный фосфор (ГОСТ 26207-91), полная полевая влагоемкость

(Практикум..., 2001). Влагоемкость почвы определяли до начала эксперимента. Остальные параметры определяли дважды до начала и после завершения опыта.

Выделение форм ^{137}Cs проводили по модифицированной методике (Chemical..., 2002). Массу навески почвы для анализа брали с таким расчетом, чтобы удельная активность пробы составляла 300-800 Бк.

Результаты и обсуждение

Прочность закрепления радионуклидов в почве зависит от реакции среды, емкости поглощения почвы, состава обменных катионов, содержания органических веществ. Поэтому, агрохимические приемы, влияющие на эти показатели, изменяют состояние радионуклида в почве.

В вегетационном опыте после уборки урожая листовой свеклы были определены агрохимические свойства торфяной почвы. Данные агрохимического анализа почвы представлены в таблице 1.

Количество свободных ионов водорода в почвенном растворе действует непосредственно на корневую систему растений и почвенные микроорганизмы, поэтому перенос радионуклидов из кислых почв в растения происходит легче, чем из нейтральных. Чем ниже значение pH почвы, тем большее количество радионуклидов поступает в растения. Внесение в почву биоугля в концентрации 1 и 3% способствовало снижению кислотности с 6,2 в контроле до 6,4 и 6,5 соответственно. С повышением концентрации биоугля в торфяной почве в опыте с листовой свеклой происходит смещение степени кислотности в нейтральную среду.

Внесение биоугля в почву в концентрации 1 и 3% способствовало некоторому увеличению таких агрохимических показателей как сумма поглощенных оснований и степень насыщенности почв основаниями, но емкость поглощения практически не изменилась. При этом такие агрохимические показатели почвы как гидролитическая кислотность, обменный Ca и Mg несколько снизились при внесении различных концентраций биоугля.

Таблица 1. Данные агрохимического анализа торфяной почвы

Показатель		Погрешность метода	Контроль	Биоуголь 1%	Биоуголь 3%
pH (в KCl), ед.		0,2 ед.	6,2±0,05	6,36±0,03	6,48±0,07
Ca (обменный)	м-моль 100 г ⁻¹	7,5%	42,2±4,17	41,65±1,65	41,28±1,93
Mg (обменный, подвижный)	м-моль 100 г ⁻¹	7,5%	8,75±1,63	6,27±1,17	7,79±0,53
P ₂ O ₅ , млн ⁻¹ (мг кг ⁻¹)		15%	1324,75±77,58	1338,5±168,63	1160,75±38,4
S, сумма поглощенных оснований, м-моль 100 г ⁻¹		10%	90,6±2,03	91,45±2,06	92,55±1,68
Hг, гидролитическая кислотность, м-моль 100г ⁻¹		12%	12,83±1,14	10,70±0,89	10,3±1,79
Т, емкость поглощения, м-моль 100г ⁻¹			103,4±2,96	101,9±2,69	102,85±3,4
V, степень насыщенности почв основаниями, %			87,63±0,86	89,53±0,69	90,03±1,42

Анализ данных показал, что внесение в торфяную почву 1% биоугля существенно снижает показатели накопления ^{137}Cs растениями. Эффект от добавления в почву биоугля в концентрации 3% оказался существенно слабее. Проведенный дисперсионный анализ (рис. 1) показал достоверность данных зависимостей при уровне значимости $p < 0,05$.

Сравнивая и анализируя полученные цифры, можно выбрать оптимальные для внесения в почву концентрации биоугля для снижения биологической доступности радионуклидов растениями.

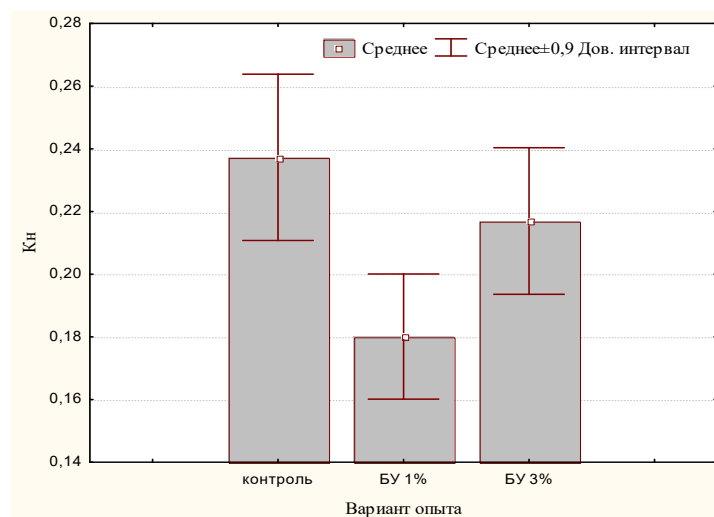


Рис. 1 – Влияние биоугля 1% (БУ 1%) и биоугля 3% (БУ 3%) на накопление ^{137}Cs в растениях

Миграция радионуклидов по почвенному профилю, их биологическая доступность для растений в значительной мере определяются процессами взаимодействия их с компонентами почвы. Большое разнообразие почв — причина значительных различий в поведении радионуклидов в почвах и накоплении их в растениях. При возделывании культурных растений на разных почвах при одном и том же уровне радиоактивного загрязнения почв поступление радионуклидов в растительную продукцию может различаться в десятки раз.

Биологическая подвижность радионуклидов, уровень накопления их в урожае сельскохозяйственных культур, зависят, в первую очередь, от содержания радионуклида в растворимой и обменной форме, то есть количества, вытесняемого из почвы растворами нейтральных солей. Подтверждением данному факту является установленная в настоящем эксперименте прямолинейная связь между долей ^{137}Cs в растворимой и обменной форме и коэффициентом его накопления в надземной биомассе мангольда (Рис. 2).

Анализ содержания биодоступных форм ^{137}Cs до и после выращивания растений в вегетационном эксперименте показало, что при внесении в почву 3% биоугля оно снижается в 1,7 раз. В то же время, в контрольном варианте наблюдалось даже некоторое повышение доли растворимой формы ^{137}Cs , что обусловлено совокупностью процессов аэробной минерализации органического вещества и изменения концентрации конкурирующих катионов.

При внесении в почву исследуемых добавок наблюдается изменение запаса доступной формы ^{137}Cs . Достаточно высокий показатель скорости потери ^{137}Cs из биодоступных форм (4,2 Бк кг⁻¹ сут⁻¹) наблюдается при внесении в почву 1% биоугля (от общей массы почвенной смеси).

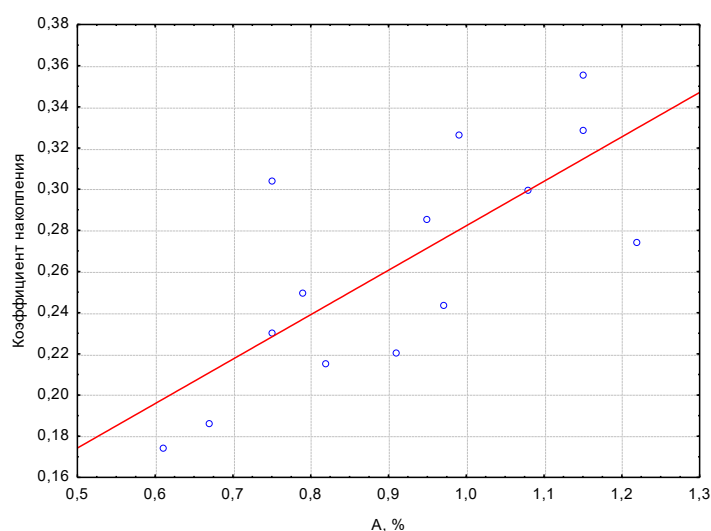


Рис. 2. Связь между долей ^{137}Cs в растворимой и обменной формах (А) и его переходом в надземную массу опытных растений

Таблица 2. Распределение ^{137}Cs в почве по физико-химическим формам

Вариант	УА почвы до, Бк кг ⁻¹	А до, %	А после, %	V, Бк кг ⁻¹ сут ⁻¹	В, %	D, %	Остаток, %
контроль	37,85±0,99	1,01	1,22	-1,9	4,48	90,66	3,64
БУ 1%	33,47±0,58	1,47	0,91	4,2	4,40	69,12	25,57
БУ 3%	33,58±0,80	1,36	0,79	3,9	4,20	69,41	25,60

Примечания: А – обменная и подвижная форма, V – скорость перехода в нерастворимую форму, В – растворимая при восстановлении форма, D – форма, связанная с органическим веществом.

Биоуголь в дозе 3% от общей массы почвенной смеси при высокой скорости уменьшения запаса биодоступной формы ^{137}Cs также снижает переход ^{137}Cs в растения, но в несколько меньшей степени.

Выводы

Показано, что внесение в почву биоугля может быть эффективным методом снижения перехода радиоактивных изотопов цезия в продукцию растениеводства. При этом доза данной почвоулучшающей добавки, обеспечивающая ее содержание в пахотном горизонте 1% по массе, является оптимальной.

Внесение в почву биоугля в концентрации 1 и 3 мас.% приводит к снижению запаса биодоступного ^{137}Cs , что является одним из основных факторов, обуславливающих снижение перехода радионуклида в растения.

Список литературы

- ГОСТ 26207-91: Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. 6 стр.
- ГОСТ 26212-91: Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. 5 стр.
- ГОСТ 26213-91: Почвы. Методы определения органического вещества. 6 стр.
- ГОСТ 26483-85: Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение pH по методу ЦИНАО. 4стр.
- ГОСТ 26487-85: Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния по методу ЦИНАО. 13 стр.
- ГОСТ 27821-88: Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. 4 стр.
- Практикум по агрохимии: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. академика РАСХН В.Г.Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 689с. (601-602 с.)
- Chemical speciation in the environment. Second edition / Ed. by A. M. Ure, C. M. Davidson. – Wiley, 2002. – 452 p.

INFLUENCE OF BIOCHAL ON THE ACCUMULATION OF ^{137}Cs BY LEAF BEET CULTIVATED ON ORGANIC SOILS

Shurankova O.A., Nikitin A.N., Kalinichenko S.A.

Institute of Radiobiology of National Academy of Sciences, Gomel, Belarus
shurankova@list.ru, nikitinale@gmail.com, s-a-k@list.ru

Abstract. Analysis of influence of soil-improving additives based on biochar on a reduction of root uptake of ^{137}Cs into plants was carried out to search for farming methods compatible with the principles of organic farming in areas contaminated with radionuclides. The positive effect of biochar on soil agrochemical parameters is shown. Its introduction into sandy loam and peat soils at a dose of 1–5 wt.% reduces their acidity, increases the absorption capacity, the content of available calcium and potassium, and increases the moisture capacity. The optimal dose of biochar was selected to reduce the transfer of ^{137}Cs from soil to beetroot - 1 wt.%.

Keywords. Biochar. Peat soil. Cesium-137. Beetroot.

EFFECT OF BIOCHAR ON NUTRIENT LEACHING FROM SOIL: SHORTTERM LABORATORY EXPERIMENT

ABRAMOVA T. V., BUCHKINA N. P.

Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

tv_ardasheva@mail.ru, buchkina_natalya@mail.ru

Abstract. The aim of the work was to find out whether biochar application was affecting short-term leaching of nutrients from light-textured soils of humid North-Western region of to see whether biochar application could be an effective way to retain nutrients in agricultural soils. The experiment was conducted in a laboratory. It was found that application of biochar had different effects on all the studied properties of the waters leached from a light-textured soil of North-Western region of Russia in a short-term laboratory experiment. Biochar altered the pH values of the leached waters washed out from the soil both with and without fertilizer application. Application of biochar changed the amount of N-NH_4^+ , N-NO_3^- and K washed out from both fertilised and unfertilised soil while the total amount of washed-out P was mainly affected only in the fertilised soils.

Keywords. Keyword. Keyword. Keyword. Keyword.

Introduction

Leaching of nutrients from soils can deplete soil fertility, accelerate soil acidification, increase fertiliser costs, reduce crop yields, and pose a threat of environmental pollution (Kuo et al., 2020). High levels of mineral nitrogen and phosphorus in surface and/or groundwater can contribute to eutrophication (Grizzetti et al., 2020), therefore it is a very important area of research to develop effective ways to retain nutrients in soils. One of such ways can be the introduction of biochar into agricultural soils.

Biochar is an organic material obtained by pyrolysis in an airless environment of a wide range of carbon-rich materials such as grasses, hardwoods, softwoods, agricultural and forestry residues. The use of biochar in agriculture is becoming more widespread as a way to increase soil moisture capacity, reduce NO_x and CH_4 emissions into the atmosphere, and to control the mobility of various environmental pollutants such as heavy metals, pesticides and other organic pollutants (Yao et al., 2012).

The aim of this work was to look whether biochar application affects leaching of nutrients from light-textured soils of humid Leningrad region.

Materials and methods

Three-day laboratory experiment was carried out at an average air temperature of 20°C and an average air humidity of 30%. The arable (0-23 cm) horizon of sod-podzolic sandy loam soil, fine fraction ($< 1 \text{ mm}$) of biochar obtained from the wood of broad-leaved trees and complex fertilizer (120 kg N, 135.2 kg P and 259 kg K ha^{-1}) were used in the experiment. There were six treatments in four replicates: soil (S); soil + biochar 10 t ha^{-1} (SB10); soil + biochar 20 t ha^{-1} (SB20); soil + fertilizer (SF); soil + biochar 10 t ha^{-1} + fertilizer (SBF10); soil + biochar 20 t ha^{-1} + fertilizer (SBF20).

The experiment was conducted in plastic cylinders (volume 940 ml, height of 12 cm) where soil with bulk density of 1.3 g cm^{-3} was incubated. The top layer (8 cm) of the soil was mixed with the biochar and fertilizer. The soil was moistened to the field capacity (20%). Cylinders with the wet soil were left to stabilize for 5 days. After stabilization, the soil water content was again brought to the field

capacity. In the experiment, the soil in the cylinders was washed daily with high rates of water (345 cm^3), simulating the maximum amount of precipitation (44 mm) observed in the natural conditions of the Leningrad region.

The leached waters were collected daily. Concentrations of mineral nitrogen (in the nitrate and ammonia forms) phosphorus and potassium, and the pH value of the leached waters were measured according to the standard methods.

Results and discussion

The content of N-NH_4^+ in the leached waters from the soil with no fertiliser, with and without biochar, varied from 3 to 6 mg dm^{-3} and was fairly uniform over the three days of the study. The introduction of mineral fertilizers into the soil (regardless of the presence of biochar) caused a significant ($p < 0.01$) increase in the content of N-NH_4^+ in the leached waters up to $30\text{-}120 \text{ mg dm}^{-3}$.

The soil of SB20 treatment was characterized by the lowest ($p < 0.01$) total content of N-NH_4^+ in the leached waters. When the mineral fertiliser was applied to the soil, there was a significant increase in the standard deviation of the values of N-NH_4^+ concentration in the leached waters from the mean, which led to the absence of significant changes between the fertilised treatments of the experiment, despite the existing differences.

The content of N-NO_3^- in the leached waters from the unfertilized and fertilized soils with and without biochar varied from 10 to 250 mg dm^{-3} . The highest ($p < 0.01$) concentrations of N-NO_3^- in the leached waters from the soil of all the treatments were noted on the first day. The soil of SB20 treatment was characterized by a significantly lowest ($p < 0.01$) total concentration of N-NO_3^- in the leached waters, while all the other treatments did not differ significantly from each other in the total concentration of nitrate nitrogen in the leached waters.

With the fertiliser application, the content of available ammonia and nitrate nitrogen in the leached waters on the third day of the experiment was significantly ($p < 0.01$) higher in the biochar treatments. Earlier (Rizhia et al., 2015) it was shown that the introduction of biochar into a sandy loamy soddy-podzolic soil led to an intensification of the nitrification process in the soil due to changes in the physical properties of soils (Buchkina et al., 2013) after biochar application. This increase in the nitrification process can explain the increase in the concentration of nitrate ions in the leached waters. However, in another study (Buchkina et al., 2017), no reliable effect of biochar on the nitrification process in the light-textured soil was established.

The leached waters from the initial soil had pH 6,70. Application of the mineral fertiliser to the soil led to a significant acidification of the leached waters (pH 6,35). In the SBF20 treatment the pH value did not decrease so significantly (pH 6,62) though 10 t ha^{-1} of biochar in the SBF10 treatment was not enough to stop the acidification of the leached waters after the fertiliser application (pH 6,35). Introduction of biochar into the soil without any fertiliser resulted in a significant increase in the pH value for the leached waters (pH 7,10).

The total amount of the leached P from the soil without fertilizer application was very low ($0,4\text{-}0,5 \text{ mg dm}^{-3}$) and independent of biochar application. The fertiliser application led to a significant increase in the total amount of P leached out of the soil ($26,31 \text{ mg dm}^{-3}$). The treatment of the fertilized soil with 10 t ha^{-1} of biochar (SBF10) had no significant effect on the reduction of P leached out of the soil ($26,30 \text{ mg dm}^{-3}$) while in the SBF20 treatment the total amount of leached P decreased significantly to $14,97 \text{ mg dm}^{-3}$.

The total amount of the leached K from the soil without fertilizer application was $47,26 \text{ mg dm}^{-3}$. Application of 20 t ha^{-1} of biochar (SB20) has resulted in a significant reduction of total K leached out of the soil ($40,59 \text{ mg dm}^{-3}$) even when the fertilizer was not applied. The fertilizer application resulted

in a significant increase in the total amount of K washed out from the soil ($387,19 \text{ mg dm}^{-3}$). Both rates of biochar used in the experiment resulted in a reduced amount of K in the leached waters from the soil but the effect of 10 t ha^{-1} of biochar was insignificant while the effect of 20 t ha^{-1} of biochar was more pronounced and was statistically significant (348 mg dm^{-3}).

Conclusions

Application of biocar had different effects on all the studied properties of the waters leached from a light-textured soil of North-Western region of Russia in a short-term laboratory experiment. Biochar altered the pH values of the leached waters washed out from the soil both with and without fertilizer application. Application of biochar changed the amount of N-NH_4^+ , N-NO_3^- and K washed out from both fertilised and unfertilised soil while the total amount of washed out P was mainly affected only in the fertilised soils.

References

- Buchkina N.P., Balashov E.V., Šimanský V., Igaz D., Horák J. (2017). Changes in biological and physical parameters of soils with different texture after biochar application. // *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]* 52(3): 471-477.
- Buchkina N., Rizhiya E., Pavlik S., Igaz D., Horak J., Balashov E. (2013). Biochar properties related to a possibility of its agricultural use // In: *Enviro Nitra. Proceedings of the 18th international scientific conference Enviro Nitra*. P. 16-20.
- Grizzetti B., Billen G., Davidson E. A., Winiwarter W., de Vries W., Fowler D., Howard C. M., Bleeker A., Sutton M. A., Lassaletta L., Garnier J. (2020). Global Nitrogen and Phosphorus Pollution. In: Sutton M.A. et al. (eds) *Just Enough Nitrogen*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58065-0_28
- Kuo, Y.-L.; Lee, C.-H.; Jien, S.-H. (2020) Reduction of Nutrient Leaching Potential in Coarse-Textured Soil by Using Biochar. // *Water* 12: 2012.
- Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Belinets A.S., Balashov E.V. (2015). Effect of biochar on the properties of loamy sand spodosol soil samples with different fertility levels: a laboratory experiment. // *Eurasian Soil Science* 48(2):192-200.
- Yao Y., Gao B., Zhang M., Inyang M., Zimmerman A. R. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil // *Chemosphere* 89: 1467–1471.

CHANGES IN CROP YIELDS AS A RESULT OF BIOCHAR APPLICATION AND REAPPLICATION

AYDIN E.¹, HORÁK J.¹, IGAZ D.¹, ŠIMANSKÝ V.²

¹ Department of Biometeorology and Hydrology, Slovak University of Agriculture, Nitra, Slovakia

² Department of Soil, Slovak University of Agriculture, Nitra, Slovakia

elena.aydin@uniag.sk

Abstract. The study presents the changes in crop yields over six years as affected by application of two biochar types at doses 0, 10 and 20 t ha⁻¹ in combination with N fertilizer at three doses in the field experiment on Haplic Luvisols in the temperate zone. According to the observed grain yields, the combination of 20 t ha⁻¹ of biochar with N fertilizer had the highest grain yield increase potential. The reapplication effect was studied just for two years so far, with similar results. Although, these treatments require the highest financial investments which have not been returned by an increase in crop yields yet, the other benefits of the biochar application should be taken into account when considering its application in practice.

Keywords. Haplic Luvisols. Biochar. Crop yield. Nitrogen fertilizer. Reapplication.

Introduction

In the context of climate change and carbon sequestration, biochar application and its effect on a decrease of greenhouse gas emission, an improvement of soil properties and water retention is being studied worldwide (Karer et al., 2013). With the same importance, focus of other studies is aimed to assess the effect of biochar as a potential soil amendment and fertilizer on crop yields. Liu et al. (2013) in their work present analysis of dataset of 103 publications on plot and field studies with biochar showing positive response of crop productivity to biochar application. Different effects have been observed as a result of initial biochar properties depending on feedstock and production conditions, application dose, combination with another fertilizers and soil amendments, reapplication period, and grown crop (Aydin et al., 2020). Moreover, the related research is conducted under different soil and climate conditions, what makes the comparison of the observations even more difficult. Majority of the studies reports the effect of biochar after one or two years of its application. There is a lack of studies reporting the effect more than three years after biochar application. Even less studies are related to repeated biochar application.

In this context we would like to present the results of our field experiment where we aimed to study the effect of biochar application and its reapplication in agricultural land on Haplic Luvisols in the temperate zone. We hypothesized that biochar addition will increase the productivity of grown crops and that the effect will be more pronounced when it will be combined with mineral fertilizer.

Materials and methods

The study site is located in Dolná Malanta (48°19' N, 18°09' E) in Slovakia. Prior to the start of the experiment, field had been cropped with maize (*Zea mays* L.) using conventional tillage. The soil was classified as Haplic Luvisols (FAO, 2015) and according to the initial soil analyses it was slightly acidic (soil pH was 5.71) and low in the soil organic carbon (9.13 g kg⁻¹) (Horák et al., 2020).

Initially, fifteen treatments with 3 replicates each, were established to assess the effects of two biochar types in combination with mineral fertilizer. Pure biochar (PB) was produced from paper fiber sludge and grain husks (1: 1 w/w) (Sonnenerde, Austria) by pyrolysis at 550 °C for 30 minutes in a Pyreg reactor (Horák, 2015). Biochar enriched with compost and mineral N (BC) was purchased from the

same company as a ready-to-use product. Biochar was sprayed with 10 % ammonium sulfate and when cold mixed with organic material for compost in the ratio of 50 : 50% v/v, and co-composted prior to application (Kondrlova, Horak, Igaz, 2018). The experimental plots (4 m x 6 m) were organized into a randomized block design and biochar was applied in the soil up to the depth of 10 cm in spring 2014. The treatments consisted of three different PB and BC application rates (0 t ha⁻¹ (B0), 10 t ha⁻¹ (PB10 and BC10) and 20 t ha⁻¹ (PB20 and BC20) that were combined with 3 levels of mineral fertilizer – ammonium nitrate (levels +N0 (not fertilized), +N1 and +N2) (table 1). In 2017, the experiment continued only on plots with the first type of biochar (PB treatments) and plots with BC were not further fertilized. Nevertheless, to observe the long-term effect of biochar application, the crop yields were evaluated also for biochar with compost in 2018 and 2019. In 2018, the experimental plots with PB were subjected to biochar reapplication (PB reapplied at 50 % of plot size). The application dose was the same as in 2014 (table 1).

The site was sown with spring barley (*Hordeum vulgare* L.) in 2014, maize in 2015, spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in 2016, maize in 2017, spring barley in 2018 and maize in 2019. Grain yield was determined at the end of vegetation season. Aboveground plant material was taken from one randomly selected 1 m row (maize – wide row crop) or 0.5 m x 0.5 m square (spring barley and spring wheat – narrow row crops) (Aydin et al., 2020). To evaluate the data, analysis of variance – one-way ANOVA and LSD test at $P \leq 0.05$ were done in the STATGRAPHICS software.

Table 1. Amount of applied biochar and N fertilizer at two fertilized levels.

Year	2014	2015 – 2019			2018	2019
Biochar application			Biochar reapplication			
Acronym (first half)	Application dose in t ha ⁻¹ ₁		Acronym (first half)		Application dose in t ha ⁻¹ ₁	
B0	0	0	B0		0	0
PB10 and BC10	10	0	PB10re		10	0
PB20 and BC20	20	0	PB20re		20	0
Year of application	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Acronym (second half)	N fertilizer application dose in kg N ha ⁻¹					
+N0	0	0	0	0	0	0
+N1	40	160	100	160	40	160
+N2	80	240	150	240	80	240

Results and discussion

The crop yields observed for individual treatments were compared to control treatment B0+N0. The percentage differences are reported in table 2. The first harvest after biochar application (in 2014) showed an increase in spring barley production in most of the treatments with both types of biochar. A significant increase was observed at treatments with biochar combined with compost (treatments BC10+N0, BC20+N0, BC20+N1 and BC10+N2). The yields at these treatments were at the same time higher than the country's average. However, the same trend did not occur in 2015. All treatments but PB10+N0 resulted in lower maize yield in comparison to control. However, the only significant decrease was observed at BC10+N2 (in contrary to the highest increase in 2014). In comparison to the climatic normal, the experimental site received the normal amount of precipitation during extremely warm year (2014 was wet but also extremely warm). On the other hand, the crop yields at all treatments were higher than the observed average yield of maize at the national level. In 2016, when spring wheat

was grown, only treatment with pure biochar PB20+N2 resulted in a significantly higher yield when compared to control treatment B0+N0 (by +51 %) and it was also higher than the national average. In general, higher yields were observed when biochar was combined with N fertilizer (except BC treatments at second level of fertilization).

Table 2. Crop yield at control treatment (n = 3) and percentage differences in the yield at other treatments and the national average (%).

Treatment	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	Grain yield $\pm$ standard deviation t ha ⁻¹ at control treatment B0+N0					
B0+N0	3.1 $\pm$ 1.2 ^{ab}	10.4 $\pm$ 2.0 ^b	3.0 $\pm$ 1.0 ^a	6.9 $\pm$ 0.9 ^a	3.2 $\pm$ 0.7 ^a	8.6 $\pm$ 2.5 ^{abc}
	Difference in observed yield in comparison to control treatment B0+N0 (%)					
PB10+N0	+ 42.3 ^{abcd}	+ 2.2 ^b	- 9.8 ^a	- 18.4 ^a	- 13.2 ^a	+ 7.4 ^{abcd}
PB20+N0	- 10.5 ^a	- 7.2 ^b	- 3.9 ^a	- 19.4 ^a	- 14.8 ^a	+ 10.7 ^{abcd}
PB10re+N0	-	-	-	-	- 18.5 ^a	+ 0.1 ^{abc}
PB20re+N0	-	-	-	-	+ 12.1 ^a	- 25.8 ^a
BC10+N0	+ 66.5 ^{cd *}	- 23.2 ^{ab}	+ 6.1 ^{ab}	-	+ 6.0 ^a	- 3.0 ^{abc}
BC20+N0	+ 77.7 ^{cd *}	- 26.1 ^{ab}	+ 9.6 ^{ab}	-	+ 2.4 ^a	+ 19.8 ^{abcd}
B0+N1	+ 2.5 ^{ab}	- 37.3 ^{ab}	+ 21.4 ^{ab}	- 3.4 ^a	+ 10.9 ^a	+ 28.1 ^{bcd}
PB10+N1	+ 7.0 ^{ab}	- 36.4 ^{ab}	+ 9.8 ^{ab}	- 23.8 ^a	- 20.3 ^a	+ 17.6 ^{abcd}
PB20+N1	+ 0.2 ^{ab}	- 33.8 ^{ab}	+ 32.5 ^{ab}	+ 11.5 ^a	- 0.6 ^a	+ 19.7 ^{abcd}
PB10re+N1	-	-	-	-	+ 16.5 ^a	+ 5.8 ^{abcd}
PB20re+N1	-	-	-	-	+ 13.6 ^a	+ 41.7 ^{cd}
BC10+N1	+ 47.0 ^{bcd}	- 21.2 ^{ab}	+ 31.7 ^{ab}	-	+ 2.4 ^{a ON}	- 1.1 ^{abc ON}
BC20+N1	+ 70.4 ^{cd *}	- 6.1 ^{ab}	+ 37.7 ^{ab}	-	+ 27.9 ^{a ON}	- 9.4 ^{ab ON}
B0+N2	+ 26.1 ^{abc}	- 37.4 ^{ab}	+ 30.4 ^{ab}	+ 16.9 ^a	+ 23.6 ^a	-12.2 ^{ab}
PB10+N2	+ 48.9 ^{bcd}	- 27.8 ^{ab}	+ 29.4 ^{ab}	- 6.9 ^a	+ 2.1 ^a	+ 11.2 ^{abcd}
PB20+N2	+ 35.6 ^{abc}	- 22.5 ^{ab}	+ 51.3 ^{b *}	+ 1.6 ^a	+ 39.1 ^a	+ 49.8 ^{d *}
PB10re+N2	-	-	-	-	- 17.5 ^a	+ 13.7 ^{abcd}
PB20re+N2	-	-	-	-	+ 0.2 ^a	+ 36.7 ^{bcd}
BC10+N2	+ 91.3 ^{d *}	- 59.2 ^{a *}	+ 6.2 ^{ab}	-	+ 2.8 ^{a ON}	+ 2.8 ^{abcd ON}
BC20+N2	+ 44.1 ^{bcd}	- 18.6 ^{ab}	- 5.3 ^a	-	- 4.2 ^{a ON}	- 1.8 ^{abc ON}
	Difference in national average yield in comparison to control B0+N0 (%)					
Country's average**	+ 52.1	- 53.2	+ 47.2	- 17.8	+ 20.7	- 14.2

Notes: different letters within the same column represent significant differences between treatments at P $\leq$ 0.05

* denotes a statistically significant difference between treatment and control variant

^{ON} denotes treatments formerly fertilized but without N fertilizer application in the specific year

** according to public database of the Statistical Institute of the Slovak Republic (STATdat, 2020)

The weather conditions at the site in 2017 were following the normal temperature trend but precipitation was very low. During this year, only treatments with pure biochar were evaluated. There were no statistical differences observed. An increase in the crop yield was observed at treatment PB20+N1 and PB20+N2. However, in the case of latter treatment, the increase is attributed to N

fertilizer since the fertilized control treatment B0+N2 resulted in higher yield than PB20+N2. When compared to the national average yield, higher yields were observed at all studied treatments at the first and second level of fertilization (except PB20+N1) and control treatment. The weather conditions at the site in 2018 were very dry with extremely warm temperature, which could be one of the reasons why there were no significant differences observed between the treatments. The increase in spring barley yield was observed at both fertilized control treatments (B0+N1 and B0+N2) without biochar application. However, the highest increase was recorded at PB20+N2 by +39% in comparison to control B0+N0, what confirmed the positive effect of biochar combination with N fertilizer. Interestingly, an increase by 28% was observed at the treatment BC20+N1, where N fertilizer was last applied in 2016. The effect of reapplication was positive (although not significant) at non-fertilized treatment PB20re+N0 and fertilized treatments at the first fertilization level (PB10re+N1 and PB20re+N1), however the opposite can be said about the second fertilization level. In 2019 – the first year after biochar reapplication, the maize yield increase was observed for treatments with reapplied biochar at both fertilization levels. Considering that 2019 was wet and warm in comparison to climatic normal, we assume, that the site had received enough rain for reapplied biochar to better homogenize with soil and N fertilizer to be efficiently dissolved and retained by biochar and used by plants. There was no effect of biochar combined with compost at plots that were formerly fertilized, however the treatment BC20+N0 showed an increase up to +20% in comparison to control B0+N0. All treatments with the first type of biochar PB resulted in an increase of maize yield (except PB20re+N0) in comparison to control B0+N0 and the national maize yield average, however, this increase was only significant at treatment PB20+N2. In this case, the increase can be attributed to biochar more than fertilizer, since the yield in the fertilized control (B0+N2) was lower. Although, the positive effect on increasing grain yield at non-fertilized treatments was observed mainly during the first and second year after biochar application, in 2019 an increase by more than 7 % (when compared to control) was observed for three non-fertilized treatments.

Considering the observed grain yields, we can conclude that combination of 20 t ha⁻¹ of biochar with N fertilizer (PB20+N1, PB20re+N1 and PB20+N2) has the highest grain yield increase potential. When considering biochar reapplication, so far, the positive effect of additional biochar resulted in another increase of the yield only in treatment PB20re+N1 (when compared to PB20+N1). However, these treatments require the highest financial investments. Besides there were observed some increases in crop yields over the studied years, the cost / benefit analysis comparing the maintenance costs with obtained yields so far resulted in net loss (Šimanský et al., 2020). We suppose that the uncertainty of investment recovery might be demotivating in practical application situations as farmers cannot not usually afford to wait for the potential long-term biochar effect to prevail. In the case of our experiment, there are few issues that could cause the current negative balance. Firstly, the purchase price of biochar used in this study was rather high. However, with a higher demand for biochar, the offer on the market is increasing what results in higher availability of biochar at lower prices. Besides the weed regulation by herbicides, some experimental plots were at least periodically infested by various types of weeds. Majority were less dangerous weeds such as field bindweed (*Convolvulus arvensis* L.), chickweed (*Stellaria media* (L.) Vill.), scentless chamomile (*Anthemis arvensis* L.) and shepherd's purse (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.). However, some plots were periodically considerably infested by creeping thistle (*Cirsium arvense* (L.) Scop.) what could cause a decrease in the final crop yield at some plots and contribute to high variability in the results within the treatments. Finally, it is hard to gain homogenous soil conditions in the field experiment. As Liu et al. (2013) pointed out, a general disadvantage of long-term field trials is that they are usually adversely impacted by environmental variability. Moreover, the observed crop yields could be partially affected by the

weather conditions on our rainfed experimental site as a result of ongoing climate change. Besides the positive effect of biochar application on soil properties at our experimental site published in several works (e. g. Horák et al., 2020, Aydin et al., 2020), the soil quality improvement did not linearly result in a crop yield increase. Our results are in agreement with study of Karer et al. (2013) who observed that besides the significant increase of pH and soil organic carbon increase, there was no significant increase of nutrient intake and correlation with observed crop yields in their experiment.

Conclusions

Our results confirmed the hypothesis that biochar addition can increase the productivity of grown crops. It was also confirmed that the effect was more pronounced when biochar was combined with mineral fertilizer. The highest long-term grain yield increase potential was observed for combinations of higher dose of pure biochar with especially the higher dose of N fertilizer. Similar trend was observed also in case of pure biochar reapplication. Besides these observations – to some extent influenced by heterogenous conditions at the site and climate conditions – the crop yield increase was not enough to return the maintenance cost for the specific treatments. We assume that the changes in crop yield did not fully reflect the positive changes of biochar application on soil properties, and thus additional research should investigate the nutrient availability in biochar amended soils in relation to changing soil moisture. Moreover, ways of financial quantification of the effects of biochar application on environment should be sought to be able – similarly to crop yields – to quantify the complex environmental impact.

Acknowledgements

This research was funded by the Scientific Grant Agency, grant number VEGA 1/0747/20 and VEGA 1/0064/19 and the Cultural and Educational Grant Agency, KEGA (No. 019SPU-4/2020). Further, this publication is the result of the project implementation: „Scientific support of climate change adaptation in agriculture and mitigation of soil degradation” (ITMS2014+ 313011W580) supported by the Integrated Infrastructure Operational Programme funded by the ERDF.

References

- Aydin, E., Šimanský, V., Horák, J., Igaz, D. (2020) Potential of biochar to alternate soil properties and crop yields 3 and 4 years after the application. *Agronomy*. Vol. 10: 889.
- FAO. (2015) World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils And Creating Legends For Soil Maps; FAO: Rome, Italy.
- Horák, J. (2015) Testing biochar as a possible way to ameliorate slightly acidic soil at the research field located in the Danubian Lowland. *Acta Hort. Regiotecture*. Vol. 18, 1: 20–24.
- Horák, J., Šimanský, V., Aydin, E., Igaz, D., Buchkina, N., Balashov, E. (2020) Effects of biochar combined with N-fertilization on soil CO₂ emissions, crop yields and relationships with soil properties. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 29, 5: 1–13.
- Karer, J., Wimmer, B., Kloss, S., Soja, G. (2013) Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions. *Agricultural and Food Science*. Vol. 22, 4: 390–403.
- Kondrlova, E., Horak, J., Igaz, D. (2018) Effect of biochar and nutrient amendment on vegetative growth of spring barley (*Hordeum vulgare* L. var. Malz). *Australian Journal of Crop Science*. Vol. 12, 2:178–184.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., Paz-Ferreiro, J. (2013) Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant Soil*. Vol. 373: 583–594.
- STATdat. (2020) Branch Statistics > Agriculture, Forestry, Fisheries > Yields of Selected Agricultural Crops > Select Data > Hectare Yields (Tons). – <http://statdat.statistics.sk>.
- Šimanský, V., Aydin, E., Igaz, D., Horák, J. (2020) Besides its environmental benefits, application of biochar depends mainly on its profits for farmers. *Agriculture* (first revision under consideration).

CHANGES IN WATER VAPOR ADSORPTION-DESORPTION OF BIOCHAR DURING ITS AGEING IN SANDY SPodosol

BALASHOV E., RIZHIYA E.

Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

Eugene_Balashov@mail.ru

Abstract. Measurements of relationships between total water potentials and hygroscopic water contents of aged biochars from sandy soil were carried out during water vapor adsorption-desorption processes at a room temperature of 23.5°C. The results showed a significantly lower content of maximum hygroscopic water in the aged biochars than that in the non-aged biochar at the end of water vapor adsorption processes at high air humidity. During the process of desorption of hygroscopic water magnitudes of its retention were insignificantly higher in the aged biochars than in the non-aged biochar.

Keywords. Soil biochar. Ageing. Water vapor. Adsorption-desorption.

Introduction

Biochar has attracted a growing interest in the past two decades due to its potential benefit for carbon sequestration, soil fertility, mitigating greenhouse gas emission, and soil amelioration (Glaser et al., 2002; Lehmann and Joseph, 2009; Rizhiya et al., 2015, 2020). Biochar is a co-product of the pyrolysis of different organic waste. Organic matter of biochar consists of amorphous, crystalline aromatic structures and therefore is resistant to biotic and abiotic mineralization (Keiluweit et al., 2010). Biochar can be produced in the process of slow (hours) and fast (minutes) pyrolysis of biomass without access of oxygen at high temperatures of 300-900°C (Lehmann et al., 2011; Singh et al., 2014). Carbon content in biochar can exceed 80% depending on technological conditions of pyrolysis and feedstock type (Lehmann et al., 2011). Technological conditions of pyrolysis and types of feedstock can result in different of physicochemical properties of biochar. Therefore, biochars of different origin can demonstrate different effects on soil properties and quality (Kuppusamy et al., 2016).

The recalcitrant nature of biochar does not protect its changes in aromatic organic matter and surface properties when ageing in soils (Fang et al., 2014; Keith et al., 2011). Biotic and abiotic oxidation of biochar in soils can lead to an increase in a density of oxygen-containing functional groups (OFGs) on its surface. The high density of polar OFGs (carboxyl, carbonyl and phenolic hydroxyl) on the biochar surface can increase its affinity to water molecules, nutrients and organic pollutants. Interactions of biochar with clay minerals lead to a formation of new organo-mineral complexes and can result in its stabilization of biochar in soil (Brodowski et al., 2005; Fang et al., 2014). The quantification of changes in the surface properties of biochar while ageing in soils is a crucial aim of current research.

The objective of this study was to quantify the changes in water vapor adsorption-desorption characteristics of biochar after its seasonal ageing in sandy Spodosol.

Material and methods

The study was carried out at the Menkovo experimental station of the Agrophysical Research Institute in the St. Petersburg region of Russia (59°34'N, 30°08'E) in 2019. The studied soil was a sandy Spodosol and contained 91.7% sand, 5.2% silt, and 3.1% clay particles. A small-scale field experiment was established on May 20 of 2019. The experiment was located on plots (4 m²) and consisted of two treatments: 1. Soil without application of biochar, 2. Soil with applications of biochar at a rate of 20 t

ha⁻¹. There were three randomized replications of each treatment. Particles of biochar were mixed with topsoil layers (0-10 cm) at the beginning of the experiment. A particle size of the incorporated biochar was <2 cm. A slow pyrolysis was carried out to produce biochar from small birch logs and branches in a controlled kiln at temperature of 600°C. Afterwards the produced biochar (or non-aged biochar) was oxidated in air conditions during several months. Chemical and physical properties of the non aged biochar were: total carbon content – 87%, total N content – 0.4%, pH_{H2O} – 7.8, moisture content – 1.92% and ash content – 0.23%. All the soil chemical and physical analyses were conducted by standard and traditional methods used in Russian soil science laboratories (Rastvorova et al., 1995).

On June 19 and August 28 soil samples with biochar particles were taken from topsoil layers of the treatment with biochar. Afterwards these samples were air-dried and sieved through a sieve with diameters of openings of 2 and 3 mm and biochar particles of the same diameters were carefully collected. Then the air-dried biochar particles were gently shaken on this sieve to detach soil particles from biochar particles as much as possible. Before the beginning of water vapor adsorption-desorption measurements all biochar samples were kept at a room temperature of 23.5°C and at an ambient laboratory atmosphere for one day to achieve an equilibrium content of hygroscopic water in the biochar samples.

A dewpoint potentiometer (WP4-T, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) was used to measure water potentials of the non-aged and aged biochar samples. A weight of biochar samples was equal to 0.5 g. Three samples of non-aged and aged biochar were subjected to cycles of water vapor adsorption-desorption processes. During the 24-h adsorption process the biochar samples were saturated by water vapor in plastic vapor-tight vessels (100 cm³) over distilled water at 95-98% relative air humidity (p/p_0) up to equilibrium maximum hygroscopic water content (HWC_{max}). The measurements of water potentials and weights of the biochar samples were done immediately after the end of the adsorption process of water vapors. Afterwards desorption process of hygroscopic water included several subsequent measurements of the water potentials and weights of biochar samples until the samples were reaching (during several hours) an equilibrium minimum hygroscopic water content at the room temperature and relative air humidity. After the end of the desorption process the biochar samples were dried at 105°C and their moisture content was calculated. The hygroscopic water retention curves included combined results of three cycles of water vapor desorption processes for the non-aged and aged biochar samples.

Means and standard deviations were calculated for maximum hygroscopic water contents (HWC_{max}) of all the studied samples after the water vapor adsorption processes. The results were subjected to an analysis of variance (one-way ANOVA) at $P \leq 0.05$.

Results and discussion

Our results showed that the highest values of HWC_{max} were observed in the non-aged biochar – $13.1\% \pm 0.9\%$ (of weight). The ageing of biochar in the soil resulted in a decrease of HWC_{max} to $10.0\% \pm 0.3\%$ (June 19) and $10.0\% \pm 0.5\%$ (August 28), respectively. There were no significant differences between the HWC_{max} of the aged biochars from soil but the differences between the values of HWC_{max} in the non-aged biochar and the two aged biochars were statistically significant ($P < 0.001$).

After the adsorption process mean total water potentials of non-aged biochar were equal to -3.5 MPa $\pm$ -0.5 MPa. The ageing of biochar caused an increase of mean values of total water potentials to -2.7 MPa $\pm$ -0.7 MPa (June 19) and -2.7 MPa $\pm$ -0.8 MPa (August 28). However, the ageing biochar in soil from June 19 to August 29 did not affect its surface properties participating in water vapor adsorption.

Freshly produced biochar often demonstrates a high hydrophobicity because of presence of hydrophobic organic substances on its surface and in its pores (Jeffery et al., 2015). Long-term oxidation of biochar surface resulted in an increase of its hydrophilicity due to a mineralization of hydrophobic organic substances (Singh et al., 2014; Suliman et al., 2016). The removal of hydrophobic organic substances from micro-, meso- and macropores led to increasing their ability to adsorption of higher amounts of water vapors.

At the beginning of adsorption process at low p/p_0 water molecules form bonds with previously surface-associated water molecules and OFGs, and this process results in a formation of small separate water clusters. These clusters grow at a higher p/p_0 (50%) and fill micropores of biochar. With increasing p/p_0 (up to 90%) the water clusters form bridges with each other and fill meso- and macropores (Liu et al., 2017).

During ageing of biochar in soils organic matter and clay particles can penetrate into its pores and prevent water adsorption in them (Wang et al., 2019). Therefore, a total volume of water retaining pores in the non-aged biochar can be greater than that in the aged biochars. The above-mentioned differences in magnitudes of HWC_{max} as well as those between total water potentials probably support our opinion.

According to Do et al. (2009), desorption of hygroscopic water from an activated coal initially occurs due to a transformation of larger water clusters in macropores to smaller ones before they are desorbed from micropores. An intensity of the desorption process of hygroscopic water depends upon a number of larger clusters in the pores and on their volumes and sizes.

The hygroscopic water retention curves of the non-aged and aged biochars are presented in Figure.

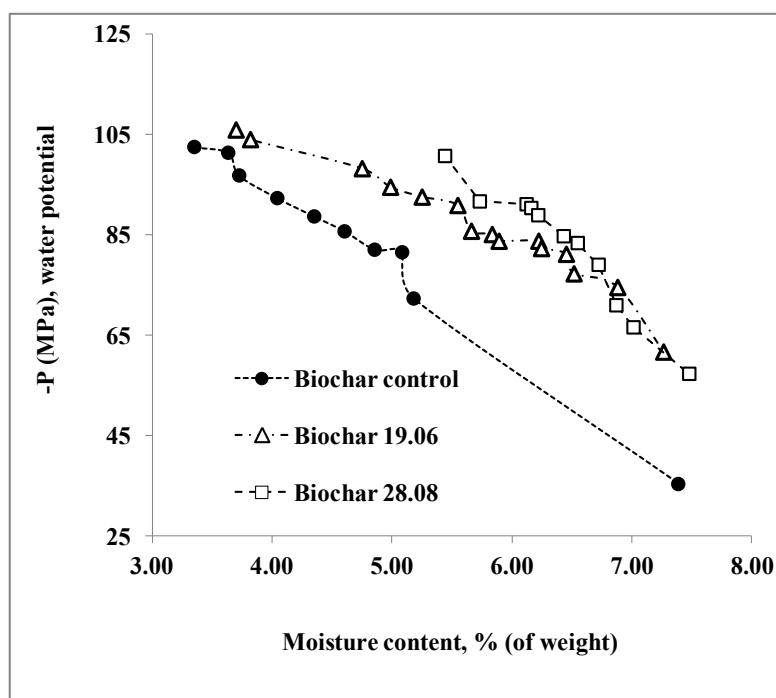


Fig. Hygroscopic water retention curves of non-aged biochar and aged biochars from soil on June 19 and August 28, 2019.

The results of our studies showed that ageing of biochar had contributed to an increase in water retention capacity of both aged biochars compared to that of non-aged biochar. Nevertheless, water

retention of biochar collected on August 28 was only slightly higher than water retention of biochar sampled on June 19 at water potentials less than -85 MPa.

A desorption of hygroscopic water from the non-aged biochar occurred from higher volumes of micro-, meso-, and macropores compared to those of both aged biochars. Higher magnitudes of retention of hygroscopic water by both aged biochars could be induced by higher density of OFGs and volumes of pores retaining hygroscopic water. Carboxyl groups demonstrate the highest affinity towards water molecules (Brennan et al., 2001). Water molecules tend to cluster around carboxyl groups, regardless of the presence of carbonyl or hydroxyl functional groups. The ageing of biochars probably led to increasing density, first of all, of carboxyl groups which, apart from pores, played a stronger role in the retention of adsorbed hygroscopic water during the desorption process (Singh et al., 2014).

Conclusions

The ageing of biochars in soils caused a significant decrease in a maximum adsorption of hygroscopic water content as compared to that of the non-aged biochar, probably, as a result of blocking pores by organic matter and clay particles.

The ageing of biochars in soils resulted in higher magnitudes of retention of hygroscopic water than that of non-aged biochar, probably, as result of increasing density of oxygen-containing functional groups.

Acknowledgements

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-016-00038-A).

References

- Brennan J.K., Bandosz T. J., Thomson K.T., Gubbins K. E. (2001) Water in porous carbons. Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects. Vol.187: 539-568.
- Brodowski S., Amelung W., Haumaier L., Abetz C., Zech W. (2005) Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy // *Geoderma*, Vol. 128: 116-129.
- Do D.D., Junpirom S., Do H.D. (2009) A new adsorption-desorption model for water adsorption in activated carbon. *Carbon*. Vol. 47, 6: 1466-1473.
- Fang Y., Singh B., Singh B.P., Krull, E. (2014) Biochar carbon stability in four contrasting soils // *European Journal of Soil Science*. Vol. 65, 1: 60-71.
- Glaser B., Lehmann J., Steiner C., Nehls T., Yousaf M., Zech W. (2002) Potential of pyrolyzed organic matter in soil amelioration. In 12th ISCO Conference'. Beijing, pp. 421-427.
- Jeffery S., Meinders M.B., Stoof C.R., Bezemer T.M., van de Voorde T.F., Mommer L., van Groenigen J.W. (2015) Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil // *Geoderma*. Vol. 251: 47-54.
- Keiluweit M., Nico P.S., Johnson M.G., Kleber M. (2010) Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) // *Environmental science & technology*. Vol. 44: 1247-1253.
- Keith A., Singh B., Singh, B.P. (2011) Interactive priming of biochar and labile organic matter mineralization in a smectite-rich soil // *Environmental Science & Technology*. Vol. 45: 9611-9618
- Kuppusamy S., Thavamani P., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R. (2016) Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions // *Environment international*. Vol. 87: 1-12.

- Lehmann J., Joseph S. (2009) Biochar for environmental management: an introduction. Biochar for environmental management: Science and technology. Vol. 1: 1-12.
- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D. (2011) Biochar effects on soil biota—a review // Soil Biology and Biochemistry. Vol. 43: 1812-1836.
- Liu L., Tan S. J., Horikawa T., Do D.D., Nicholson D., Liu, J. (2017) Water adsorption on carbon-A review // Advances in colloid and interface science. Vol. 250: 64-78.
- Rastvorova O.G., Andreev D.P., Gagarina E.I., Kasatkina G.A., Fedorova N.N. (1995) Chemical analysis of soils. Saint-Petersburg, St. Petersburg Publishing House, 254 p. (in Russian).
- Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Belinets A.S., Balashov, E.V. (2015) Effect of biochar on the properties of loamy sand Spodosol soil samples with different fertility levels: A laboratory experiment // Eurasian Soil Science. Vol. 48, 2: 192-200.
- Rizhiya E. Y., Horák J., Šimanský V., Buchkina N.P. (2020) Nitrogen enriched biochar-compost mixture as a soil amendment to the Haplic Luvisol: effect on greenhouse gas emission // Biologia. Vol. 75: 873-884.
- Singh B., Fang Y., Cowie B.C., Thomsen L. (2014) NEXAFS and XPS characterisation of carbon functional groups of fresh and aged biochars //Organic Geochemistry. Vol. 77: 1-10.
- Suliman W., Harsh J. B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer I., Garcia-Perez M. (2016) Modification of biochar surface by air oxidation: Role of pyrolysis temperature// Biomass and Bioenergy. Vol. 85: 1-11.
- Wang D., Li C., Parikh S.J., Scow K.M. (2019) Impact of biochar on water retention of two agricultural soils—A multi-scale analysis// Geoderma. Vol. 340: 185-191.

PROPERTIES OF BIOCHAR PRODUCED BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION OF ORGANIC WASTE

VLASKIN M.S.

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 13/2 Izhorskaya St,
Moscow, 125412, Russia
vlaskin@inbox.ru*

Abstract. The study of the process of hydrothermal carbonization (HTC) of food waste, paper, wood and fabric at temperature of 260 °C was carried out. The study and comparison of the chemical composition and energy potential of the starting materials and products of the HTC were carried out. It was shown that the resulting biochar contains 50 to 90% of the carbon contained in the feedstock (depending on the composition of the feedstock and process parameters), and the calorific value of the biochar obtained reaches 25-30 MJ kg⁻¹.

Keywords. Biochar. Hydrochar. Hydrothermal carbonization. Organic waste.

Introduction

In recent years, one of the most promising ways to utilize organic waste in order to obtain the so-called hydrochar is the hydrothermal carbonization (HTC). In the process of HTC, organic waste is subjected to wet heat treatment in an environment of saturated water vapor of subcritical parameters. In the process of hydrothermal carbonization, the feedstock undergoes a number of changes as a result of the simultaneous reactions of hydrolysis, dehydration, decarboxylation, aromatization, and recondensation (Lombardi et al., 2015). As a result of this process, a suspension is formed, after separation of which into liquid and solid phases and drying of the latter, hydrochar is obtained. The obtained biochar can be used as a fuel (both independently and as an additive to conventional coal), as well as for the production of adsorbents or catalyst carriers (Cui et al., 2006; Demir-Cakan et al., 2009; Jain et al., 2015; Sevilla et al., 2011; Wang et al., 2001; Zhen et al., 2006). The advantages of HTC are relatively low process temperatures, no need for drying the feedstock, homogenized composition of the product, and high relative carbon content (relative to feedstock).

Currently, the number and scope of research in the field of hydrothermal processing of organic waste and biomass is extremely limited. Most of the work in this area was carried out on model raw materials. The main purpose of this work was to study the HTC process for individual ingredients that make up most of the organic waste: food waste, paper, wood, and textiles. The objectives of the study were to study and compare the chemical composition and energy potential of the starting components and products of the HTC.

Materials and methods

A reactor with a volume of 0.6 dm³ was loaded with 150 g of distilled water and 30 g of initial waste. The waste was preliminary dried in a Binder VD53 drying oven at 105°C. Prior to the experiment, the reactor was sealed and purged with nitrogen. The reactor was then gradually heated to 260°C during approximately 120 min and held at this temperature for 60 min. As a result, the pressure in the reactor was set slightly above the pressure of saturated water vapor at 260°C. After the experiment, the reactor was opened and its content, which was generally a mixture of an aqueous solution of organic compounds and a solid residue, was removed from it. The solid residue was then separated from the aqueous solution using paper filters and dried in a Binder VD53 drying oven at 105°C.

Elemental analysis (content of C, H, N, O, S) was carried out with a Thermo Scientific Flash 2000 HT analyzer (the content of oxygen was calculated by subtracting the content of C, H, N, and S from 100%). The heating value was determined using an IKA C6000 calorimeter.

Results and discussion

Figure 1 shows the Van Krevelen diagram for the initial ingredients and products of their hydrothermal treatment at 260°C. The points characterizing the initial ingredients in the Van Krevelen diagram fall into the region typical for biomass. The hydrothermal treatment reduces the H/C and O/C atomic ratios in the solid product. Characteristics of the products of organic waste HTC at 260°C fall basically into the region typical for bituminous and brown coals. The Van Krevelen diagram also shows the direction of a change in the composition of a sample on removal of CH₄, H₂, NH₃, CH₄O, H₂O, NO_x, SO_x, CO₂, and CO molecules. Based on the presented regions, we can estimate the chemical transformations that occur in the course of hydrothermal treatment of the ingredients. From the above data, it follows that the most probable reactions in the HTC process for the substances considered are dehydration and cleavage of low molecular hydrocarbon groups. According to (Lin et al., 2016), reactions with the formation of H₂O, CO₂, and CO prevail at relatively low temperatures of the hydrothermal treatment.

It has been shown that the calorific value of HTC products exceeds the calorific value of the initial organic ingredients and is at the level of 21 to 29 MJ/kg, which corresponds to the values of the calorific value of commercially available lignite and bituminous coal. The heat of the combustion of plastics remains practically unchanged after hydrothermal treatment.

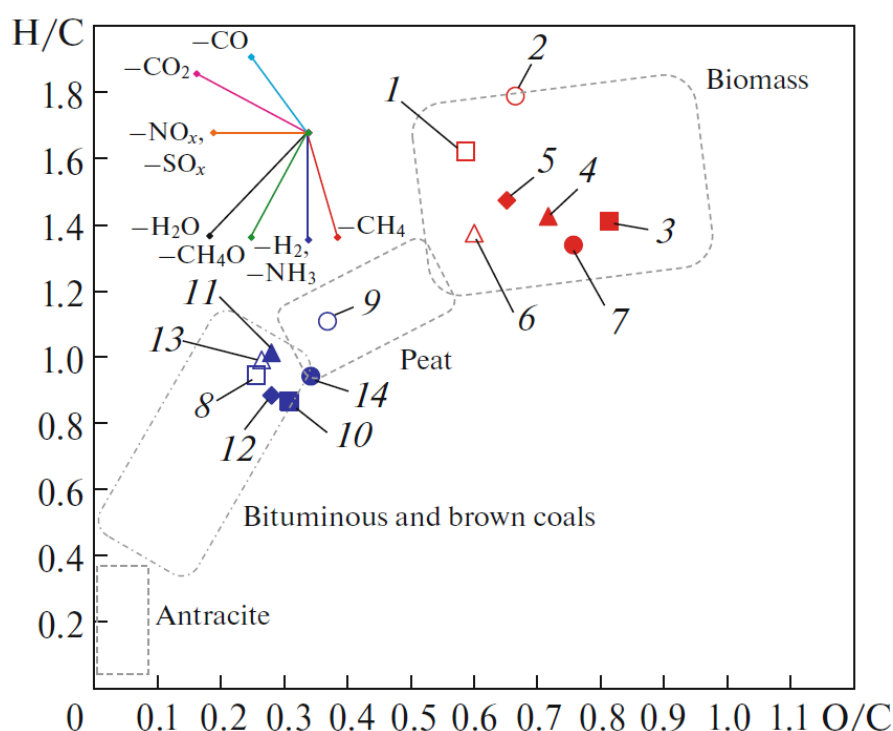


Fig. 1. Van Krevelen diagram for (1–7) initial ingredients and (8–14) products of their hydrothermal treatment at 260°C (data are presented on the dry ash-free basis): 1, 8—apple; 2, 9—meet; 3, 10—offset paper; 4, 11—newsprint; 5, 12—birch sawdust; 6, 13—oak sawdust; 7, 14—cotton cloth. Red—initial ingredient; blue—HTC products.

A large amount of nitrogen-containing compounds is dissolved in water, as shown by the results of (Kostyukevich et al., 2017). So, one of the key issues in the field of HTC is the utilization of water-soluble organic compounds (aqueous solution) formed during the hydrothermal treatment of waste. One of the possible ways of using this product is to obtain from it a base for fertilizers. Here we are talking about extracting from waste, mainly nitrogen and phosphorus, concentrating them in the composition of an aqueous solution and using the latter as a fertilizer. For this purpose, relevant work is currently being carried out (Idowu et al., 2017; McGaughy and Reza, 2018; Toufiq Reza et al., 2016).

Conclusions

According to the results of studies, the bio-coal produced by the HTC method accumulates from 50 to 90% of the carbon contained in the raw waste (depending on the composition of the raw waste and process conditions). The heating value of the produced bio-coal is as high as 25–30 MJ/kg, which is close to heating value of commercial power coals. Disposal of water-soluble organic compounds (aqueous solution) formed in the HTC treatment of waste is still among the key issues in this area. Despite the available studies, this problem requires further investigations.

References

- Cui, X., Antonietti, M., Yu, S.-H., 2006. Structural Effects of Iron Oxide Nanoparticles and Iron Ions on the Hydrothermal Carbonization of Starch and Rice Carbohydrates. *Small* 2, 756-759.
- Demir-Cakan, R., Baccile, N., Antonietti, M., Titirici, M.-M., 2009. Carboxylate-Rich Carbonaceous Materials via One-Step Hydrothermal Carbonization of Glucose in the Presence of Acrylic Acid. *Chem. Mater.* 21, 484-490.
- Idowu, I., Li, L., Flora, J.R.V., Pellechia, P.J., Darko, S.A., Ro, K.S., Berge, N.D., 2017. Hydrothermal carbonization of food waste for nutrient recovery and reuse. *Waste Manage. (Oxford)* 69, 480-491.
- Jain, A., Xu, C., Jayaraman, S., Balasubramanian, R., Lee, J.Y., Srinivasan, M.P., 2015. Mesoporous activated carbons with enhanced porosity by optimal hydrothermal pre-treatment of biomass for supercapacitor applications. *Microporous Mesoporous Mater.* 218, 55-61.
- Kostyukevich, Y., Vlaskin, M., Vladimirov, G., Zhrebker, A., Kononikhin, A., Popov, I., Nikolaev, E., 2017. The investigation of the bio-oil produced by hydrothermal liquefaction of *Spirulina platensis* using ultrahigh resolution Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *European Journal of Mass Spectrometry* 23, 83-88.
- Lin, Y., Ma, X., Peng, X., Yu, Z., 2016. A Mechanism Study on Hydrothermal Carbonization of Waste Textile. *Energy & Fuels* 30, 7746-7754.
- Lombardi, L., Carnevale, E., Corti, A., 2015. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Manage. (Oxford)* 37, 26-44.
- McGaughy, K., Reza, M.T., 2018. Recovery of Macro and Micro-Nutrients by Hydrothermal Carbonization of Septage. *J. Agric. Food. Chem.* 66, 1854-1862.
- Sevilla, M., Fuertes, A.B., Mokaya, R., 2011. High density hydrogen storage in superactivated carbons from hydrothermally carbonized renewable organic materials. *Energy & Environmental Science* 4, 1400-1410.
- Toufiq Reza, M., Freitas, A., Yang, X., Hiibel, S., Lin, H., Coronella, C.J., 2016. Hydrothermal carbonization (HTC) of cow manure: Carbon and nitrogen distributions in HTC products. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 35, 1002-1011.
- Wang, Q., Li, H., Chen, L., Huang, X., 2001. Monodispersed hard carbon spherules with uniform nanopores. *Carbon* 39, 2211-2214.
- Zhen, F., Kaibin, T., Shuijin, L., Tanwei, L., 2006. CTAB-assisted hydrothermal synthesis of Ag/C nanostructures. *Nanot* 17, 3008.

АВТОРСКИЙ УКАЗТЕЛЬ

- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| Абрамова Т.В., 101 | Костецкий Д.М., 49 |
| Айдин Н., 104 | Лобзенко И.П., 3, 35, 54 |
| Аксенова Т.С., 91 | Манджиева С.С., 54 |
| Антоненко С.А., 35 | Минкина Т.М., 3, 35, 54 |
| Балашов Е. В., 71, 109 | Москвин М.А., 58, 71 |
| Барахов А.В., 3 | Нестерова О.В., 8, 13, 76 |
| Бауэр Т.В., 54 | Никитин А.Н., 96 |
| Белая А.А. 8 | Овсянникова С.В., 86 |
| Бовсун М.А., 13 | Окунев Р.В., 81 |
| Бойцова Л.В., 16 | Орлова Е.Е., 63, 91 |
| Брень Д.В., 3 | Орлова Н.Е., 63, 91 |
| Брикманс А.В., 8, 13, 39, 76 | Патрушева О.В., 8 |
| Бурачевская М.В., 54 | Погонышев П.Д., 35 |
| Бучкина Н.П., 101 | Попеня М.В., 86 |
| Вертебный В. Е., 71 | Попова А.Д., 67 |
| Власкин М.С., 114 | Рижия Е.Я., 16, 49, 71, 109 |
| Гиниятуллин К.Г., 81 | Сакара Н.А., 13, 76 |
| Горовцов А.В., 35 | Седерлунд Х., 31 |
| Гурова Т.А., 21 | Семаль В.А., 13, 39, 67, 76 |
| Дубовицкая В.И., 58, 71 | Смирнова Е.В., 81 |
| Дубровина И. А., 26 | Смирнова К.А., 63 |
| Дудникова Т.С., 3 | Соколик Г.А., 86 |
| Железова А.Д., 31 | Сушкова С.Н., 35 |
| Зинченко В.В., 35 | Сушкова С.С., 54 |
| Иванкова А.И., 39 | Ткачева А.Ю., 58 |
| Иванов А. И., 44 | Федоренко Е.С., 35 |
| Игаз Д., 104 | Хомяков Ю. В., 71 |
| Карпенко Т.Ю., 76 | Хорак Я., 104 |
| Кичко А.А., 91 | Шахназарова В.Ю., 63, 91 |
| Клиниченко С.А., 96 | Шиманский В., 104 |
| Конончук П.Ю., 58 | Шуранкова О.А., 96 |

AUTHOR INDEX

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Abramoba T. V., 101 | Lobozenko I.P., 3, 35, 54 |
| Aksenova A.A., 91 | Mandzhieva S.S., 54 |
| Antonenko S.A., 35 | Minkina T. M., 3, 35, 54 |
| Aydin E., 104 | Moskvin M. A., 58, 71 |
| Balashov E. V., 71, 109 | Nesterova. O.V., 8, 13, 76 |
| Barakhov A.V., 3 | Nikitin A.N., 96 |
| Bauer T.V., 54 | Okunev R.V., 81 |
| Belaia A. A., 8 | Orlova E.E., 63, 91 |
| Boitsova L.V., 16 | Orlova N.E., 63, 91 |
| Bovsun M. A., 13 | Ovsiannikova S.V., 86 |
| Bren D. V., 3 | Papenia M.V., 86 |
| Brikmans A. V., 8, 13, 39, 76 | Patrusheva. O. V., 8 |
| Buchkina N. P., 101 | Pogonyshchev P.D., 35 |
| Burachevskaya M.V., 54 | Popova A.D., 67 |
| Cederlund H., 31 | Rizhiya E. Y., 16, 49, 71, 109 |
| Dubovitskaya V. I., 58, 71 | Sakara N.A., 13, 76 |
| Dubrovina I. A., 26 | Semal V. A., 13, 39, 67, 76 |
| Dudnikova T. S., 3 | Shahnazarova V.Yu., 63, 91 |
| Fedorenko E.S., 35 | Shurankova O.A., 96 |
| Giniyatullin K.G., 81 | Šimanský V., 104 |
| Gorovcov A.V., 35 | Smirnova E.V., 81 |
| Gurova T. A., 21 | Smirnova K.A., 63 |
| Horák J., 104 | Sokolik G.A., 86 |
| Igaz D., 104 | Sushkova S.N., 35 |
| Ivankova A. I., 39 | Sushkova S.S., 54 |
| Ivanov A. I., 44 | Tkachyova A.Y., 58 |
| Kalinichenko S.A., 96 | Vertebniy V. E., 71 |
| Karpenko T.Yu., 76 | Vlaskin M.S., 114 |
| Khomyakov Y. V., 71 | Zhelezova A. D., 31 |
| Kichko A.A., 91 | Zinchenko V.V., 35 |
| Kononchuk P.Y., 58 | |
| Kostetskiy D. M., 49 | |

СОДЕРЖАНИЕ

ВЛИЯНИЕ БИОЧАРА НА ПОДВИЖНОСТЬ CU В СОЧЕТАНО ЗАГРЯЗНЕННОМ ЧЕРНОЗЕМЕ ОБЫКНОВЕННОМ	
БАРАХОВ А.В., ЛОБЗЕНКО И.П., ДУДНИКОВА Т.С., МИНКИНА Т.М., БРЕНЬ Д.В.	3
ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА СОДЕРЖАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФОРМ АЗОТА В ПОЧВЕ И БИОМАССЕ КАПУСТЫ	
БЕЛАЯ А.А., ПАТРУШЕВА О.В., НЕСТЕРОВА О.В., БРИКМАНС А.В.	8
ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ БИОУГЛЯ В ДРЕНАЖНОЙ И БЕЗДРЕНАЖНОЙ СИСТЕМЕ НА ЭМИССИЮ CO₂ И CH₄ ИЗ ПОЧВ	
БОВСУН М.А., НЕСТЕРОВА О.В., СЕМАЛЬ В.А., БРИКМАНС А.В., САКАРА Н.А.	13
ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА СЕЗОННУЮ ДИНАМИКУ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОРМ АЗОТА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ РАЗНОГО КАЧЕСТВА	
БОЙЦОВА Л.В., РИЖИЯ Е.Я.	16
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ БИОУГЛЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ РФ	
ГУРОВА Т.А.	21
ПРОЛОНГИРОВАННОЕ ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ	
ДУБРОВИНА И. А.	26
ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА АДсорбЦИЮ ГЕРБИЦИДОВ В ПОЧВЕ	
ЖЕЛЕЗОВА А.Д., CEDERLUND H.	31
БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЫ НА ФОНЕ ВНЕСЕНИЯ БИОЧАРА	
ЗИНЧЕНКО В.В., ПОГОНЫШЕВ П.Д., АНТОНЕНКО С.А., ФЕДОРЕНКО Е.С., ЛОБЗЕНКО И.П., ГОРОВЦОВ А.В., МИНКИНА Т.М., СУШКОВА С.Н.	35
ПРОТИВОЭРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АГРОПОЧВ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ	
ИВАНКОВА А.И., БРИКМАНС А.В., СЕМАЛЬ В.А.	39
БИОУГОЛЬ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОСВОЕНИЯ ЗАКУСТАРЕННОЙ ЗАЛЕЖИ	
ИВАНОВ А. И.	44
ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В РФ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОУГЛЯ	
КОСТЕЦКИЙ Д.М., РИЖИЯ Е.Я.	49
ИЗГОТОВЛЕНИЕ БИОЧАРА ДЛЯ ИНАКТИВАЦИИ МЕДИ В ЛУГОВОЙ ПОЧВЕ	
ЛОБЗЕНКО И.П., БАУЭР Т.В., БУРАЧЕВСКАЯ М.В. МАНДЖИЕВА С.С., СУШКОВА С.С., МИНКИНА Т.М.	54
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА АКТИВНОСТЬ ОКСИДРЕДУКТАЗ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ	
МОСКВИН М.А., ДУБОВИЦКАЯ В.И., ТКАЧЕВА А.Ю., КОНОНЧУК П.Ю.	58
О СТАБИЛИЗАЦИИ ГУМУСА АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БИОУГЛЯ	
ОРЛОВА Н.Е., ОРЛОВА Е.Е., ШАХНАЗАРОВА В.Ю., СМЕРНОВА К.А.	63

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПАХОТНЫХ ГОРИЗОНТОВ АГРОТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОДБЕЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОУГЛЯ	
ПОПОВА А.Д., СЕМАЛЬ В.И.	67
СТАРЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ БИОУГЛЯ В ПОЧВЕ	
РИЖИЯ Е. Я., БАЛАШОВ Е. В., ХОМЯКОВ Ю. В., ВЕРТЕБНЫЙ В. Е., ДУБОВИЦКАЯ В. И., МОСКВИН М. А.	71
АГРОТЕМНОГУМУСОВЫЕ ПОДБЕЛЫ КАК ПРИМЕР СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЧВ ЮГА ПРИМОРСКОГО КРАЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ БИОУГЛЯ	
СЕМАЛЬ В.А., НЕСТЕРОВА О.В., КАРПЕНКО Т.Ю., БРИКМАНС А.В., САКАРА Н.А.	76
ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ВНЕСЕНИЯ БИОУГЛЕЙ В ПОЧВЫ	
СМИРНОВА Е.В., ГИНИЯТУЛЛИН К.Г., ОКУНЕВ Р.В.	81
ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОДВИЖНОСТЬ В ПОЧВАХ ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ КАДМИЯ, СВИНЦА И УРАНА	
СОКОЛИК Г.А., ОВСЯННИКОВА С.В., ПОПЕНЯ М.В.	86
ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БИОУГЛЯ НА КОМПЛЕКС ПОЧВЕННЫХ ГРИБОВ АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ МЕТОДАМИ МЕТАГЕНОМНОГО АНАЛИЗА И ПОСЕВА НА ПИТАТЕЛЬНУЮ СРЕДУ	
ШАХНАЗАРОВА В.Ю., КИЧКО А.А., АКСЕНОВА Т.С., ОРЛОВА Н.Е., ОРЛОВА Е.Е.	91
ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ¹³⁷CS ЛИСТОВОЙ СВЕКЛОЙ, ВЫРАЩЕННОЙ НА ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЧВАХ	
ШУРАНКОВА О.А., НИКИТИН А.Н., КЛИНИЧЕНКО С.А.	96
ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА ВЫМЫВАНИЕ ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЧВЫ: КОРОТКИЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ	
АБРАМОВА Т.В., БУЧКИНА Н.П.	101
ИЗМЕНЕНИЕ УРОЖАЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ И ПОВТОРНОГО ПРИМЕНЕНИЯ БИОУГЛЯ	
АЙДИН Е., ХОРАК Я., ИГАЗ Д., ШИМАНСКИ В.	104
ИЗМЕНЕНИЯ В АДсорбЦИИ-ДЕсорбЦИИ ПАРОВ ВОДЫ БИОУГЛЁМ ВО ВРЕМЯ ЕГО СТАРЕНИЯ В СУПЕСЧАНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ	
БАЛАШОВ Е.В., РИЖИЯ Е.Я.	109
СВОЙСТВА БИОУГЛЯ, ПРОИЗВОДИМОГО ПРИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ	
ВЛАСКИН М. С.	114
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	117

CONTENT

EFFECT OF BIOCHAR ON CU MOBILITY IN COMBINED POLLUTED HAPLIC CHERNOZEM BARAKHOV A.V., LOBZENKO I. P., DUDNIKOVA T. S., MINKINA T. M., BREN D. V.	3
INFLUENCE OF BIOCHAR ON THE CONTENT OF SOME FORMS OF NITROGEN IN SOIL AND CABBAGE BIOMASS BELAIA A. A., PATRUSHEVA. O. V., NESTEROVA. O.V., BRIKMANS A.V.	8
INFLUENCE OF BIOCHAR RATES IN DRAINED AND UNDRAINED SYSTEMS ON CO₂ AND CH₄ EMISSION FROM SOILS BOVSUN M. A., NESTEROVA O. V., SEMAL V. A., BRIKMANS A.V.	13
INFLUENCE OF BIOCHAR ON SEASONAL DYNAMICS OF MINERAL FORMS OF NITROGEN IN SODDY-PODZOLY SANDY SOILS OF VARIOUS PRODUCTIVITY BOITSOVA L.V., RIZHIYA E. YA.	16
MAIN DIRECTIONS OF RESEARCH ON THE USE OF BIOCHAR IN AGRICULTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION GUROVA T. A.	21
PROLONGED INFLUENCE OF BIOCHAR ON AGROCHEMICAL PROPERTIES OF SODDY-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL DUBROVINA I. A.	26
THE INFLUENCE OF BIOCHAR ON THE ADSORPTION OF HERBICIDES IN SOIL ZHELEZOVA A. D., CEDERLUND H.	31
BIOLOGICAL ACTIVITY OF MEADOW CHERNOZEM IN A MODEL EXPERIMENT WITH BIOCHAR APPLICTION ZINCHENKO V.V., POGONYSHEV P.D., ANTONENKO S.A., FEDORENKO E.S., LOBZENKO I.P., GOROVCOV A.V., MINKINA T.M., SUSHKOVA S.N.	35
ANTI-EROSION PROPERTIES OF AGRICULTURAL SOILS AFTER BIOCHAR APPLICATION IVANKOVA A. I., BRIKMANS A. V., SEMAL V.A.	39
BIOCHAR FOR MANAGEMENT AND DEVELOPMENT OF SHRUBBY ABANDONED LANDS IVANOV A. I.	44
POSSIBILITIES OF USING ORGANIC WASTE IN THE RUSSIAN FEDERATION FOR PRODUCTION OF BIOCHAR KOSTETSKIY D. M., RIZHIYA E. Y.	49
MANUFACTURING OF A SORBENT FOR INACTIVATION OF COPPER IN ORDINARY CHERNOZEM LOBOZENKO I.P., BAUER T.V., BURACHEVSKAYA M.V. MANDZHIEVA S.S., SUSHKOVA S.S., MINKINA T.M.	54
INFLUENCE OF TEMPERATURE AND MOISTURE ON THE ACTIVITY OF POLYPHENOL OXIDASE AND PEROXIDASE IN SODDY-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL MOSKVIN M. A., DUBOVITSKAYA V. I., TKACHYOVA A.Y., KONONCHUK P.Y.	58
THE STABILIZATION OF AGRO SODDY-PODZOLIC SOIL HUMUS UNDER BIOCHAR ORLOVA N.E., ORLOVA E.E., SHAHNAZAROVA V.YU., SMIRNOVA K.A.	63
THE HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF ENDOARGIC ANTHROSOLS PLOUGHED HORIZON WITH BIOCHAR POPOVA A.D., SEMAL V. I.	67

AGING AND TRANSFORMATION OF BIOCHAR IN LOAMY SAND PODZOLIC SOIL	
RIZHIYA E. Y., BALASHOV E. V., KHOMYAKOV Y. V., VERTEBNIY V. E., DUBOVITSKAYA V. I., MOSKVIN M. A.	71
AGROTHERMNOHUMUS PODBELS AS AN EXAMPLE OF AGRICULTURAL SOILS IN THE SOUTH OF PRIMORSKY KRAI FOR BIOCHAR APPLICATION	
SEMAL V.A., NESTEROVA O.V., KARPENKO T.YU., BRIKMANS A.V., SAKARA N.A.	76
ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISKS OF BIOCHAR APPLICATION TO SOILS	
SMIRNOVA E.V., GINIYATULLIN K.G., OKUNEV R.V.	81
INFLUENCE OF BIOCHAR ON CADMIUM, LEAD AND URANIUM FORMS DETERMINING THEIR MOBILITY IN SOILS	
SOKOLIK G.A., OVSIANNIKOVA S.V., PAPENIA M.V.	86
THE STUDY OF THE BIOCHAR IMPACT ON AGRO SODDY-PODZOLIC SOIL FUNGI COMPLEX BY METAGENOMIC ANALYSIS AND SEEDING ON THE NUTRIENT MEDIUM	
SHAHNAZAROVA V.YU., KICHKO A.A., AKSENOVA A.A., ORLOVA N.E., ORLOVA E.E.	91
INFLUENCE OF BIOCHAR ON THE ACCUMULATION OF ¹³⁷CS BY LEAF BEET CULTIVATED ON ORGANIC SOILS	
SHURANKOVA O.A., NIKITIN A.N., KALINICHENKO S.A.	96
EFFECT OF BIOCHAR ON NUTRIENT LEACHING FROM SOIL: SHORTTERM LABORATORY EXPERIMENT	
ABRAMOVA T. V., BUCHKINA N. P.	101
CHANGES IN CROP YIELDS AS A RESULT OF BIOCHAR APPLICATION AND REAPPLICATION	
AYDIN E., HORÁK J., IGAZ D., ŠIMANSKÝ V.	104
CHANGES IN WATER VAPOR ADSORPTION-DESORPTION OF BIOCHAR DURING ITS AGEING IN SANDY SPODOSOL	
BALASHOV E., RIZHIYA E.	109
PROPERTIES OF BIOCHAR PRODUCED BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION OF ORGANIC WASTE	
VLASKIN M.S.	114
AUTHOR INDEX	118

ISBN 978-5-905200-44-1



9 785905 200441

Материалы международного научного семинара
«Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и
окружающую среду».
ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г.

Технический редактор: А. Ю. Цивилев

Подписано в печать 04.12.2020
Подготовлено к печати в ФГБНУ АФИ
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14.