

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЯМИ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

И. М. Мухина¹, А. С. Дурова²

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14

²ФБУ «Рослесозащита», центр защиты леса Ленинградской области
194021, г. Санкт-Петербург, Институтский проспект, д. 21, литера М

E-mail: muhinairina1989@gmail.com

Поступила в редакцию 02 февраля 2017 г., принята к печати 27 февраля 2017 г.

В вегетационно-полевом эксперименте проводился мониторинг экологического состояния дерново-подзолистой супесчаной почвы с различной степенью окультуренности и эмиссии парниковых газов после внесения биоугля. Высокой чувствительностью к изменению окружающей среды и к различным агроприемам обладают почвенные микроорганизмы. Поэтому для диагностики состояния почвы при внесении биоугля в конце первого года исследования были проведены лабораторные исследования, целью которых являлись изучение изменения биологических характеристик, а также оценка эффективности использования питательных элементов ячменем. Изучалось базальное и субстрат-индуцированное дыхание, углерод микробной биомассы, накопление азота, фосфора и калия в зерне и соломе, урожайность ячменя. При внесении в почву биоугля происходило увеличение интенсивности базального дыхания в 1,2 и в 1,3 раза в почве со средней и высокой степенью окультуренности, соответственно. Также повышалось содержание углерода микробной биомассы на 22% в почве со средней степенью окультуренности и на 74% – в почве с высокой степенью окультуренности. При внесении биоугля совместно с минеральным удобрением увеличение содержания углерода микробной биомассы в обеих в почвах достигло 200%. Внесение биоугля в средне окультуренную почву привело к повышению концентрации азота в зерне ячменя в 1,1 раза, а в соломе – в 1,2 раза по сравнению с контрольным вариантом. При этом вынос фосфора и калия зерном и соломой ячменя из почвы с биоуглем существенно не отличался от выноса этих элементов из почвы без биоугля. Внесение биоугля увеличило урожайность зерна ячменя на 61% в средне окультуренной почве и на 49% в высоко окультуренной почве по сравнению с почвой без биоугля.

Ключевые слова: биоуголь, базальное дыхание, субстрат-индуцированное дыхание, вынос питательных элементов, ячмень, средняя и высокая степень окультуренности.

THE EFFECT OF BIOCHAR ON BIOLOGICAL PROPERTIES OF LOAMY SAND SPodosol AND EFFICIENCY OF NUTRIENTS USE BY PLANTS

I. M. Mukhina¹, A. S. Durova²

¹Agrophysical Research Institute

195220, Saint Petersburg, Grazhdanskiy pr., 14

²Russian center of forest health

194021, Saint Petersburg, Institutskiy pr., 21 M

E-mail: muhinairina1989@gmail.com

The field experiment was conducted at the loamy sand Spodosol with different soil fertility to study the influence of biochar on soil biological properties and efficiency of nutrients uptake from soils by barley. Basal and substrate-induced respiration, and microbial biomass carbon were investigated. Also the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in grain and straw of barley, and barley yield were measured. Biochar application resulted in increased basal respiration rate: up to 1,2 times and 1,3 times in soil with medium and high fertility level, respectively. Also the biochar application in the soil increased microbial biomass carbon content by 22% in the soil with medium fertility level and by 74% in the soil with high fertility level. Amendment of the soil with the combination of biochar and mineral fertilizer led to 200% increase in the soil microbial biomass carbon content for both levels of soil fertility. The most positive impact of biochar on nitrogen content in barley was observed on the soil with medium fertility level, where nitrogen concentration in barley grain increased by 1,1 times and in the straw by 1,2 times

compared to soil control. Changes in phosphorus and potassium removal by the grain and straw of barley from the soil amended with biochar were not significant compared with the soil without biochar. As a result of biochar application the grain yield increased by 61% in the soil with medium level of fertility and by 49% in the soil with high level of fertility.

Key words: biochar, basal respiration microbial biomass carbon, nutrients uptake, barley, medium and high level of soil fertility.

ВВЕДЕНИЕ

Биоуголь, как продукт термической переработки биомассы в бескислородной среде (пиролиз), используется в качестве почвенного мелиоранта для долгосрочной секвестрации углерода в почве, снижения выбросов парниковых газов в атмосферу и улучшения почвенных свойств (Jeffery с соавт., 2011, Verheijen с соавт., 2010). В результате пиролиза углерод конвертируемой биомассы переводится в ароматическое состояние, что выражается в долговременной стабильности данного продукта в почве (до сотен лет) и недоступности для микроорганизмов (Lehmann и Joseph, 2009). По физико-химическому строению – это высокопористый материал. Наличие в угле микро- и переходных пор обуславливает повышенные размеры его удельной поверхности, поэтому внесение биоугля в почву может приводить к изменению различных физических характеристик почв, таких как порозность, плотность сложения, водоудерживающая способность, влажность, что в свою очередь может влиять на изменение химических и биологических свойств почв (Sohi с соавт., 2010, van Zwieten с соавт., 2010). Так биоуголь уменьшает кислотность почвы (Van Zwieten с соавт. 2010), усиливает подвижность питательных элементов (Liang с соавт., 2006), увеличивает микробиологическую активность, состав и численность почвенных микроорганизмов (Liang с соавт., 2010, Grossman с соавт., 2010). Такие изменения воздействуют на круговорот питательных веществ в почве, косвенно воздействуя на рост и развитие растений (Steiner с соавт., 2008, Rillig и Mummey, 2006, Warnock и др., 2007).

Потребление питательных веществ растениями варьирует в зависимости от климатических условий, свойств почвы и потребностей сельскохозяйственной культуры. Как недостаток, так и избыток питательных веществ отрицательно

сказывается на росте растений и их урожайности. При благоприятных почвенно-климатических условиях и правильном применении удобрений и мелиорантов растения используют питательные вещества наиболее продуктивно. При этом потребление элементов питания на единицу урожая полученной продукции минимально. (Смирнов и Муравин, 1984). Повышение эффективности потребления питательных веществ сельскохозяйственными культурами позволяет снизить дозу вносимых удобрений, не приводя при этом к снижению урожайности. Многочисленные научные исследования показали, что внесение в почву биоугля способствует росту урожайности сельскохозяйственных культур (Jeffery с соавт., 2011, Spokas с соавт., 2012, Cornelissen с соавт., 2013). Существует множество предположений, объясняющих данный эффект, одно из которых – повышение эффективности потребления питательных веществ растениями.

К настоящему времени вопросы влияния биоугля на состав и состояние почвенных микроорганизмов, а также на развитие растений остаются актуальными, в виду большого количества противоречивых данных, полученных исследователями. Следовательно, и перспективы широкого применения данного продукта в качестве сельскохозяйственного мелиоранта остаются открытыми и требуют проведения дополнительных междисциплинарных исследований. Задачами исследования явились определение влияния биоугля на активность почвенных микроорганизмов и на эффективность использования питательных элементов ячменем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на дерново-подзолистой супесчаной почве со средней и высокой степенью окультуренности, расположенной на Агрофизическом стационаре Меньковского полигона ФБГНУ АФИ (Гатчинский район Ленинградской

области). Для достижения разной степени окультуренности в период 2003–2005 гг. в почвы разных участков агрофизического стационара внесли в общей сложности 220 т га⁻¹ и 540 т га⁻¹ навоза крупного рогатого скота.

В качестве почвенного мелиоранта использовали биоуголь, полученный путем быстрого пиролиза при температуре 550°C из мягколиственных сортов деревьев (осина, береза, ольха). Основные химические характеристики биоугля: C_{общ} – 82,6%, N_{общ} – 0,27%, рН – 7,0, влажность – 3,9%, зола – 0,2%. В качестве источника азота в данном эксперименте использовали мочевину.

Исследования проводились в бездонных 22-литровых ведрах, закопанных в изучаемые почвы. Схема вегетационно-полевого опыта включала следующие варианты: (1) К – почва-контроль без внесения биоугля и удобрения; (2) Б – почва с добавлением биоугля из расчета 10 т га⁻¹; (3) N90 – почва с внесением мочевины из расчета 90 кг N га⁻¹; (4) Б+N90 – почва с добавлением биоугля и мочевины в вышеуказанных дозах. Опыт проводили в 5-кратной повторности. Варианты опыта располагались в рандомизированном порядке. Исследуемой культурой в данном опыте послужил ячмень (*Hordeum Vulgare*).

Отбор почвенных образцов для анализа биологических показателей проводился в конце вегетационного сезона, после уборки урожая ячменя.

Для определения биологической активности микробной биомассы – базального дыхания – измеряли интенсивность продуцирования углекислого газа по скорости выделения CO₂ почвой за 24 ч ее инкубации при 28°C с анализом образцов воздуха, выделившегося из почвы на газовом хроматографе, снабженного пламенно-ионизационным детектором (Банкина с соавторами, 2002). Определение активной микробной биомассы проводилось по методике СИД с введением в почвенный субстрат раствора глюкозы (субстрат-индуцированное дыхание) (Anderson и Domsch, 1978, Ананьева и др., 1993). В стеклянные флаконы объемом 60 мл помещали 4 г свежей почвы, просеянной через сито с размером ячеек 1 мм, добавляли

0,2 мл глюкозо-минеральной смеси (ГМС, мг мл⁻¹: глюкоза – 200; K₂HPO₄ – 20; (NH₄)₂SO₄ – 20), герметично закрывали резиновыми пробками и инкубировали при 22°C в течение четырех часов.

Для определения содержания углерода микробной биомассы (C_{мик}) в почве использовали формулу пересчета скорости субстрат-индуцированного дыхания (Anderson, Domsch, 2010):

$$C_{\text{мик}} (\text{мкг г}^{-1} \text{ почвы}) = (\text{мкл CO}_2 \text{ г}^{-1} \text{ почвы час}^{-1}) \times 40,04 + 0,37.$$

Содержание азота, фосфора и калия в образцах соломы и зерна, отобранных в конце вегетационного периода, определяли методом мокрого озоления салицил-серной и хлорной кислотами (Аринушкина, 1970).

Статистический анализ был произведен с использованием пакета программ Statistics 5.0. Статистическая обработка результатов включала вычисления значений средних, стандартных отклонений и коэффициентов линейной корреляции при уровне надежности – $p \leq 0,05$. Достоверность различий оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Базальное дыхание, субстрат-индуцированное дыхание

Базальное дыхание (БД) высоко окультуренной почвы было существенно выше ($p < 0,05$), чем БД средне окультуренной почвы (рис. 1А). Минимальные различия в БД между аналогичными вариантами опыта для почв с разной степенью окультуренности отмечались для вариантов с мочевиной и биоуглем с мочевиной, которые составили 11 и 32%, соответственно, а максимальные – для вариантов контроля (80%) и почвы с добавлением биоугля (90%). Полученные данные согласуются с данными других ученых, отмечавших в своих исследованиях более высокие значения БД в почвах с высокой степенью окультуренности, которые изначально характеризовались повышенным содержанием общего углерода и минеральных форм азота, численностью бактерий протеолитической группы, количеством актиномицетов и дрожжеподобных грибов, аэробных

целлюлозоразлагающих бактерий – микроорганизмов, активно использующих легкодоступные органические соединения в своем метаболизме (De Jong с соавт., 1974, Рижия с соавт., 2011).

В средне окультуренной почве минимальным БД характеризовались почвы контрольного варианта (3 мг CO₂-C мг⁻¹ C_{мик} час⁻¹), внесение биоугля, мочевины и биоугля совместно с мочевиной существенно (p < 0,01) увеличило БД почвы по сравнению с контролем – в 1,2, 2,2 и 1,9 раза, соответственно. В высоко окультуренной почве внесение биоугля, мочевины и биоугля совместно с мочевиной увеличивало БД в 1,3–1,4 раза по сравнению с контролем, с

существенными различиями между вариантами с минеральным удобрением и без удобрения. Таким образом, внесение биоугля и удобрения способствовало росту активности микробного сообщества. Влияние азотистого субстрата на интенсивность базального дыхания было существенно выше, чем воздействие углеродистого (p < 0,05).

Для определения активности микробной биомассы в почве было проведено исследование субстрат-индуцированного дыхания (СИД) с добавлением в почву дополнительного источника углерода в виде глюкозо-минеральной смеси (рис. 1Б).

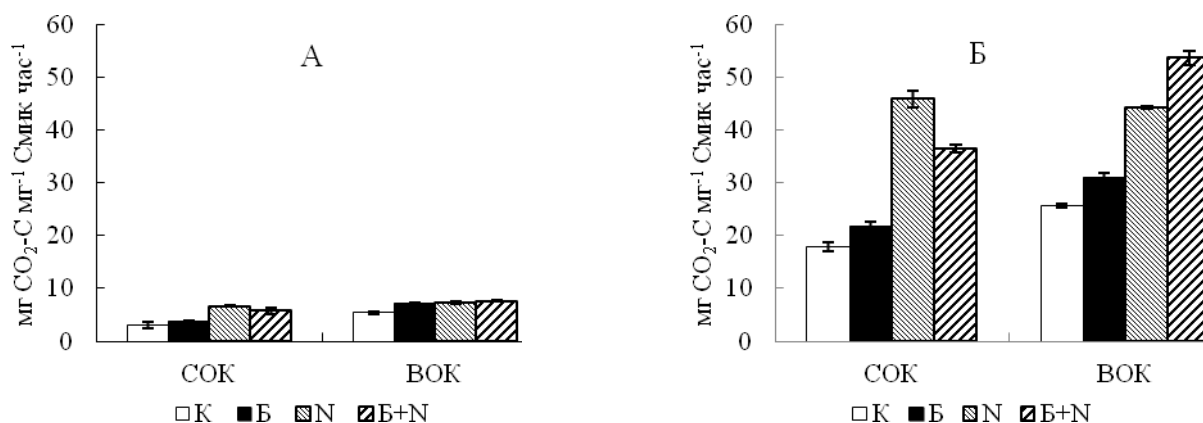


Рис. 1. Базальное (А) и субстрат-индуцированное (Б) дыхания дерново-подзолистой супесчаной почвы в различных вариантах опыта, где СОК – средне окультуренная почва, ВОК – высоко окультуренная почва, К – почва-контроль, Б – почва с биоуглем, N – почва с мочевиной, Б+N – почва с биоуглем и мочевиной.

В высоко окультуренной почве отмечалось более высокое СИД, чем в средне окультуренной почве для всех вариантов опыта, кроме варианта с мочевиной. Внесение биоугля и удобрения привело к повышению активности почвенных микроорганизмов. Внесение биоугля повысило СИД на 22%, как в СОК, так и в ВОК. При внесении мочевины

повышение СИД составляло 157 % для СОК и 73 % для ВОК. Совместное внесение биоугля с мочевиной в почву способствовало двукратному увеличению СИД.

На рисунке 2 представлена диаграмма, показывающая изменения в содержании углерода микробной биомассы при внесении в почву биоугля и мочевины.

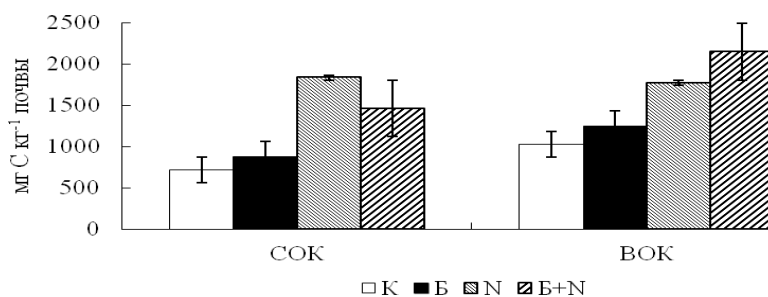


Рис. 2. Содержание микробной биомассы микроорганизмов в дерново-подзолистой супесчаной почве с различными вариантами опыта.

Содержание микробной биомассы в высоко окультуренной почве было существенно выше ($p < 0,05$) в вариантах без внесения мочевины по сравнению со средне окультуренной почвой. Внесение биоугля способствовало существенному росту ($p < 0,05$) $C_{\text{мик}}$ на 22 % и 74 % в СОК и ВОК, соответственно, добавление мочевины – на 156% в СОК и 148% в ВОК. При внесении совместно биоугля и мочевины, как в средне окультуренную, так и высоко окультуренную почву, содержание микробной биомассы возросло примерно в два раза.

Накопление азота, фосфора и калия в ячмене

В данном исследовании установлено, что внесение мочевины повысило величину и качество урожая ячменя, а также накопления N, P и K в зерне и соломе (рис. 3 А, Б, В). На средне окультуренной почве в варианте почва-контроль содержание азота в зерне составило 0,61 %, а в соломе – 0,35%. Внесение биоугля в средне окультуренную почву привело к повышению содержания N в зерне в 1,1 раза, а в соломе – в 1,2 по сравнению с контролем. Внесение мочевины в почву не влияло на изменение содержания азота в соломе, но повысило содержания азота в зерне на 1,2 раза по сравнению с контролем. Внесение биоугля совместно с удобрениями позволило повысить содержание азота в зерне в 1,5 раза, а в соломе – в 1,2 раза, по сравнению с вариантом с контролем. Полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований зарубежных ученых, показавших, что внесение биоугля в почву способствует накоплению азота в растениях (Van Zwieten с соавт., 2010, Chan с соавт., 2007).

В высоко окультуренной почве в варианте почвы без внесения мелиорантов содержание азота в зерне и соломе составило 0,89% и 0,32% соответственно. Только

внесение мочевины в почву достоверно ($p < 0,05$) повысило содержание азота в зерне в 1,2 раза, а в соломе – в 1,1 раза, тогда как внесение биоугля и комбинация биоугля с мочевиной не влияли на содержание N в зерне и соломе.

Влияние биоугля на содержание фосфора в ячмене было неоднозначно. В средне окультуренной почве содержание фосфора в контрольном варианте составляло 0,56% в зерне и 0,26% в соломе (рис. 3Б). При внесении в почву биоугля отмечалось снижение содержания P в зерне в 1,3 раза и в соломе в 1,2 раза по сравнению с контролем. При совместном внесении биоугля с мочевиной содержание P в зерне повысилось в 1,3 раза, а в соломе, наоборот, снизилось в 1,1 раза по сравнению с контрольным вариантом. В высоко окультуренной почве содержание фосфора в зерне контрольного варианта достигало 0,58%, а в соломе – 0,27%. Внесение биоугля и мочевины не влияло на содержание фосфора в зерне. В соломе ячменя содержание фосфора существенно ($p < 0,05$) возросло при внесении биоугля в почву, которое составило превышение в 1,4 раза. Внесение мочевины существенно ($p < 0,05$) снизило его содержания в 1,5 раза. В ранних исследованиях других ученых отмечалась подобная картина, связанная и с повышением, и снижением доступности фосфора растениям при внесении биоугля (Steiner с соавт., 2007, Nelson с соавт., 2011, Lehmann и Rondon, 2006, Uzoma с соавт., 2011). Биоуголь может являться как источником доступного растениям фосфора, также и напрямую и косвенно влиять на поведение фосфора в почве: изменение pH в почве, повышение активности почвенных ферментов, формирование органоминеральных комплексов, которые повышают растворимость фосфора и изменяют структуру микробиологических и

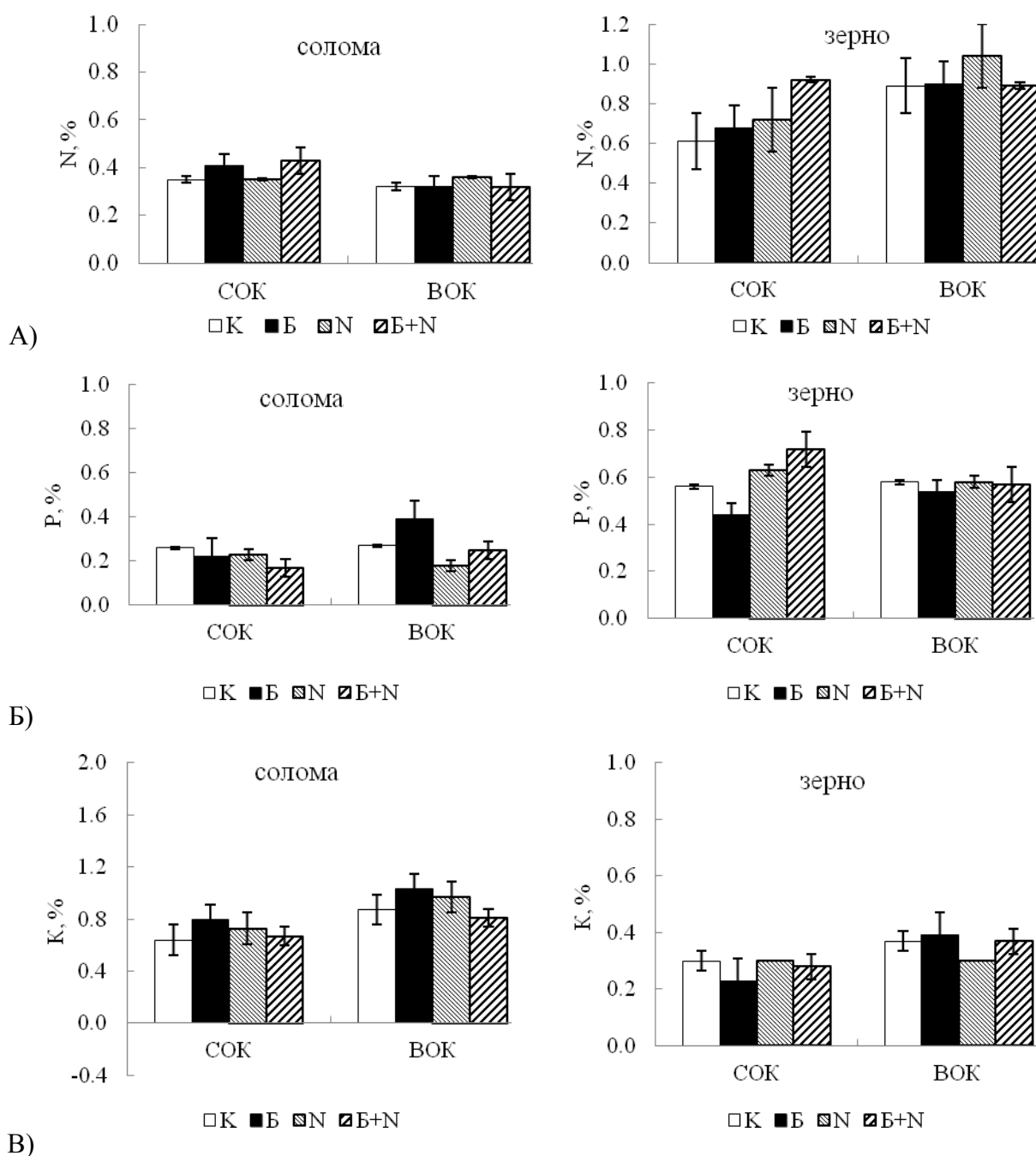


Рис. 3. Содержание азота (А), фосфора (Б) и калия (В) в соломе и зерне ячменя

растительных сообществ (DeLuca с соавт., 2015).

В средне окультуренной почве в контрольном варианте содержание калия в зерне составило 0,3%, а в соломе – 0,67%. При внесении биоугля в почву содержание калия в зерне существенно ($p < 0,05$) снизилось в 1,3 раза, а в соломе значительно ($p < 0,05$) возросло в 1,3 раза по сравнению с контролем. В высоко окультуренной почве в контрольном варианте содержание калия в

зерне составило 0,37%, а в соломе – 0,87%. Внесение биоугля существенно ($p < 0,05$) повысило содержание калия в соломе – в 1,2 раза по сравнению с контролем. Внесение мочевины привело к достоверному ($p < 0,05$) снижению содержания калия в зерне в 1,2 раза. Калий, являясь легко растворимым элементом, быстро вымывается из почвы и биоугля, не играя значительной роли в системе почва-растение. Однако, в исследованиях Widowati

и Asnah (2014) отмечалось влияние биоугля на снижение выщелачивания калия за счет повышения водоудерживающей способности почвы.

Внесение биоугля почву привело к достоверному увеличению урожайности зерна ячменя ($p < 0,05$) как на средне- так и высоко окультуренной почве, но не влияло на урожайность соломы. Так, внесение биоугля в средне окультуренную почву повысило урожайность зерна ячменя на 61%

по сравнению с контролем. Внесение биоугля в высоко окультуренную почву повысило урожайность зерна ячменя на 49%. Совместное внесение биоугля с мочевиной увеличило урожайность зерна ячменя на 158% в средне окультуренной почве и на 102% – в высоко окультуренной почве. Урожайность соломы в данном варианте эксперимента повысилась на 92% в средне окультуренной почве и на 97% в высоко окультуренной почве.

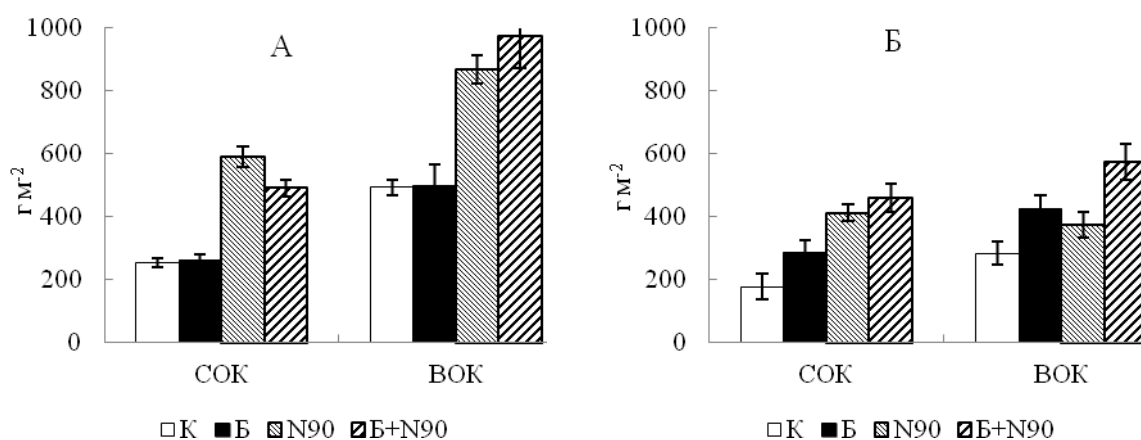


Рис. 4. Урожайность соломы (А) и зерна (Б) ячменя

ВЫВОДЫ

Установлено, что биоуголь повышает базальное и субстрат-индуцированное дыхание. Внесение биоугля из расчета 10 т га^{-1} привело к увеличению БД в 1,2 раза в средне окультуренной почве и в 1,3 раза в высоко окультуренной почве. Биоуголь способствовал росту углерода микробной биомассы на 22% и 74%, соответственно для средне – и высоко окультуренной почвы, по сравнению с контролем. Совместное внесение биоугля с минеральным удобрением увеличило содержание углерода микробной биомассы в среднем в два раза, как в средне-, так и высоко окультуренной почве.

Внесение биоугля в средне окультуренную почву привело к повышению содержания азота в зерне в 1,1 раза, а в соломе в 1,2 раза, снизило содержание фосфора в 1,2 и 1,3 раза в зерне и соломе, соответственно, снижению содержания

калия в 1,3 раза в зерне и повышению его концентрации в соломе в 1,3 раза. Биоуголь усиливал действие азотного удобрения в варианте их совместного применения и способствовал перераспределению азота из соломы в зерно.

В высоко окультуренной почве внесение биоугля увеличило содержание фосфора в соломе в 1,4 раза, а калия – в 1,2 раза.

Внесение биоугля не влияло на урожайность соломы, но достоверно ($p < 0,05$) увеличивало урожай зерна на 61% в средне окультуренной почве и на 49% в высоко окультуренной почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н. Д., Благодатская Е. В., Орлинский Д. Б., Мякшина Т. Н. Методические аспекты применения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // Почвоведение. 1993. № 11. С. 72–77.
- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М: МГУ, 1970. 488 с.
- Рижия Е. Я., Бойцова Л. В., Бучкина Н. П., Панова Г. Г. Влияние пожнивных остатков с различным отношением C/N на эмиссию закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1251–1259.
- Смирнов П. М., Муравин Э. А. Агрохимия. М.: Колос, 1984. 304 с.
- Anderson J. P. E., Domsch K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil // Soil Biol. Biochem. 1978, no. 10, pp. 215–221.
- Anderson T. H., Domsch K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach // Soil Biology and Biochemistry. 2010, no. 42, pp. 2039–2043.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment // Australian Journal of Soil Researches. 2007, no. 45(8), pp. 629–634.
- Cornelissen G., Martinsend V., Shitumbanuma V., Allig V., Breedveld G. D., Rutherford D. W., Sparrevik M., Hale S. E., Obia A., Mulder J. Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conversation farming sites in Zambia // Agronomy. 2013, no. 3, pp. 256–274.
- De Jong E., Schappert H. J. V., MacDonald K. B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate // Canadian Journal of Soil Science. 1974, no. 54, pp. 299–307.
- DeLuca T. H., Gundale M. J., MacKenzie M. D., Jones D. L. Biochar effects on soil nutrient transformations // Biochar for Environmental Management: Science Technology and Implementation / edited by J. Lehmann J. and S. Joseph. London: Earthscan. 2015. pp. 422–454.
- Grossman J. M., O'Neill B. E., Tsai S. M., Liang B., Neves E., Lehmann J., Thies J. E. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy // Microbial Ecology. 2010, no. 60, pp. 192–205.
- Jeffery S., Verheijen F. G. A., van der Velde M., Bastos A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2011, no. 144, pp. 175–187.
- Lehmann J., Joseph S. Biochar for environmental management: Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations // Biochar for Environmental Management: Science and Technology / edited by J. Lehmann and S. Joseph. London: Earthscan. 2009, pp. 251–265.
- Lehmann J., Rondon M. Bio-Char soil management on highly-weathered soils in the tropics // Biological Approaches to Sustainable Soil Systems / Edited by N. Uphoff. 2006. DOI: 10.1201/9781420017113.ch36. pp. 517–530.
- Nelson N. O., Agudelo S. C., Yuan W., Gin J. Nitrogen and Phosphorus Availability in Biochar-Amended Soils // Soil Science. 2011, no. 176, pp. 218–226.
- Rillig M. C., Mummey D. L. Mycorrhizas and soil structure // New Phytologist. 2006, no. 171, pp. 41–53.
- Spokas K. A., Cantrell K. B., Novak J. M., Archer D. A., Ippolito J. A., Collins H. P., Boateng A. A., Lima I. M., Lamb M. C., McAloon A. J., Lentz R. D., Nichols K. A. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration // Journal of Environmental Quality. 2012, no. 41, pp. 973–989.
- Sohi S., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. A review of biochar and its use and function in soil // Advances in Agronomy. 2010, no. 105, pp. 47–82.
- Steiner C., Teixeira W. G., Lehmann J., Nehls T., De Macedo J. L. V., Blum W. E. H., Zech W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil // Plant and Soil. 2007, no. 291, pp. 275–290.
- Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Downie A., Berger E., Rust J., Scheer C. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol // Australian Journal of Soil Researches. 2010, no. 48, pp. 555–568.
- Verheijen F. G. A., Jeffery S., Bastos A. C., van der Velde M., Diafas I. Biochar application to soils – a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. 2010. DOI: 10.2788/472.
- Warnock D. D., Lehmann J., Kuyper T. W., Rillig M. C. Mycorrhizal responses to biochar in soil — concepts and mechanisms // Plant and Soil. 2007, no. 300, pp. 9–20.
- Widowati, Asnah. Biochar Can Enhance Potassium Fertilization Efficiency and Economic Feasibility of Maize Cultivation // Journal of Agricultural Science. 2014, no. 6(2), pp. 24–32.

Uzoma K. C., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., Niizar E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition // *Soil Use Management*. 2011, no. 27, pp. 205–212.

REFERENCES

- Anan'eva N. D., Blagodatskaia E. V., Orlinskii D. B., Miakshina T. N. Metodicheskie aspekty primeneniia skorosti substrat-indutsirovannogo dykhaniia pochvennykh mikroorganizmov. [Methodical aspects of application of the rate of substrate-induced respiration of soil microorganisms]. *Pochvovedenie*, 1993, no. 11, pp. 72–77.
- Arinushkina E. V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv. [Guide to the chemical analysis of soils]. Moscow: Moscow University Publishing, 1970. 488 p.
- Rizhiia E. Ya., Boitsova L. V., Buchkina N. P., Panova G. G. Vlianie pozhnivnykh ostatkov s razlichnym otnosheniem C/N na emissiiu zakisi azota iz dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvy. [The effect of stubble residues with different C/N ratio on the emission of nitrous oxide from loamy sand Spodosol]. *Pochvovedenie*, 2011, no. 10, pp. 1251–1259.
- Smirnov P. M., Muravin E. A. Agrokhimiiia. [Agrochemistry]. Moscow: Kolos, 1984. 304 p.
- Anderson J. P. E., Domsch K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil // *Soil Biol. Biochem.* 1978, no. 10, pp. 215–221.
- Anderson T. H., Domsch K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010, no. 42, pp. 2039–2043.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment // *Australian Journal of Soil Researches*. 2007, no. 45(8), pp. 629–634.
- Cornelissen G., Martinsend V., Shitumbanuma V., Allig V., Breedveld G. D., Rutherford D. W., Sparrevik M., Hale S. E., Obia A., Mulder J. Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conversation farming sites in Zambia // *Agronomy*. 2013, no. 3, pp. 256–274.
- De Jong E., Schappert H. J. V., MacDonald K. B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate // *Canadian Journal of Soil Science*. 1974, no. 54, pp. 299–307.
- DeLuca T. H., Gundale M. J., MacKenzie M. D., Jones D. L. Biochar effects on soil nutrient transformations // *Biochar for Environmental Management: Science Technology and Implementation* / edited by J. Lehmann J. and S. Joseph. London: Earthscan. 2015. pp. 422–454.
- Grossman J. M., O'Neill B. E., Tsai S. M., Liang B., Neves E., Lehmann J., Thies J. E. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy // *Microbial Ecology*. 2010, no. 60, pp. 192–205.
- Jeffery S., Verheijen F. G. A., van der Velde M., Bastos A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2011, no. 144, pp. 175–187.
- Lehmann J., Joseph S. Biochar for environmental management: Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations // *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* / edited by J. Lehmann and S. Joseph. London: Earthscan. 2009, pp. 251–265.
- Lehmann J., Rondon M. Bio-Char soil management on highly-weathered soils in the tropics // *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems* / Edited by N. Uphoff. 2006. DOI: 10.1201/9781420017113.ch36. pp. 517–530.
- Nelson N. O., Agudelo S. C., Yuan W., Gin J. Nitrogen and Phosphorus Availability in Biochar-Amended Soils // *Soil Science*. 2011, no. 176, pp. 218–226.
- Rillig M. C., Mummey D. L. Mycorrhizas and soil structure // *New Phytologist*. 2006, no. 171, pp. 41–53.
- Spokas K. A., Cantrell K. B., Novak J. M., Archer D. A., Ippolito J. A., Collins H. P., Boateng A. A., Lima I. M., Lamb M. C., McAloon A. J., Lentz R. D., Nichols K. A. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration // *Journal of Environmental Quality*. 2012, no. 41, pp. 973–989.
- Sohi S., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. A review of biochar and its use and function in soil // *Advances in Agronomy*. 2010, no. 105, pp. 47–82.
- Steiner C., Teixeira W. G., Lehmann J., Nehls T., De Macedo J. L. V., Blum W. E. H., Zech W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil // *Plant and Soil*. 2007, no. 291, pp. 275–290.
- Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Downie A., Berger E., Rust J., Scheer C. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol // *Australian Journal of Soil Researches*. 2010, no. 48, pp. 555–568.
- Verheijen F. G. A., Jeffery S., Bastos A. C., van der Velde M., Diafas I. Biochar application to soils – a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. 2010. DOI: 10.2788/472.
- Warnock D. D., Lehmann J., Kuyper T. W., Rillig M. C. Mycorrhizal responses to biochar in soil — concepts and mechanisms // *Plant and Soil*. 2007, no. 300, pp. 9–20.
- Widowati, Asnah. Biochar Can Enhance Potassium Fertilization Efficiency and Economic Feasibility of Maize Cultivation // *Journal of Agricultural Science*. 2014, no. 6(2), pp. 24–32.

Uzoma K. C., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., Niizar E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition // Soil Use Management. 2011, no. 27, pp. 205–212.