

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА ПЛОТНОСТЬ СЛОЖЕНИЯ И ВОДОУДЕРЖИВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СУПЕСЧАНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ

Е. В. Балашов, Е. Я. Рижия

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14

E-mail: Eugene_Balashov@mail.ru

Поступила в редакцию 12 марта 2020 г., принята к печати 28 мая 2020 г.

В полевом эксперименте, проведённом в Меньковском филиале ФГБНУ АФИ, исследовано влияние биоугля, внесённого в дозе 20 т га⁻¹, на плотность сложения и водоудерживающую способность дерново-подзолистой супесчаной почвы со средней и высокой степенью окультуренности. Биоуголь произведён из отходов берёзы посредством быстрого пиролиза при температуре 600°C. Внесение биоугля привело к достоверному ($p < 0.01$) снижению плотности сложения среднеокультуренной почвы от 1.36 ± 0.05 г см⁻³– 1.43 ± 0.06 г см⁻³ до 1.10 ± 0.05 г см⁻³– 1.26 ± 0.02 г см⁻³ и к недостоверному уменьшению плотности сложения высокоокультуренной почвы от 1.13 ± 0.03 г см⁻³– 1.32 ± 0.01 г см⁻³ до 1.06 ± 0.06 г см⁻³– 1.21 ± 0.11 г см⁻³. Биоуголь способствовал достоверному ($p < 0.05$) увеличению водоудерживающей способности среднеокультуренной почвы в диапазоне матричных потенциалов влаги от –5 кПа до –100 кПа только в мае и сентябре. Водоудерживающая способность высокоокультуренной почвы при данных матричных потенциалах повысилась недостоверно после внесения биоугля, поскольку более высокое содержание в ней гидрофильного органического вещества также оказывало значимое влияние на распределение влагосодержащих пор по размерам. Биоуголь оказал большее влияние на содержание в обеих почвах макропор, чем мезо- и микропор. Содержание макропор в обеих почвах было недостоверно больше в вариантах с внесением биоугля, чем в контрольных вариантах. Тем не менее, сезонные достоверные изменения содержания влаги в макропорах высокоокультуренной почвы с биоуглём были более значительными, чем в макропорах среднеокультуренной почвы с биоуглём.

Ключевые слова: биоуголь, окультуренность, плотность сложения, водоудерживающая способность почв.

EFFECT OF BIOCHAR ON BULK DENSITY AND WATER RETENTION CAPACITY OF LOAMY SAND SPodosol OF DIFFERENT FERTILITY LEVELS

E. V. Balashov, E. Ya. Rizhiya

Agrophysical Research Institute

14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220

E-mail: Eugene_Balashov@mail.ru

The effect of biochar applied at a rate of 20 t ha⁻¹ on bulk density and water retention capacity of loamy sand spodosol of medium and high fertility levels has been studied at the Menkovo branch of Agrophysical Research Institute. The biochar was produced from birch waste by fast pyrolysis at a temperature of 600°C. The application of biochar led to a significant ($p < 0.01$) decrease in the bulk density of the soil of medium fertility level from 1.36 ± 0.05 g cm⁻³– 1.43 ± 0.06 g cm⁻³ to 1.10 ± 0.05 g cm⁻³– 1.26 ± 0.02 g cm⁻³ and to an insignificant decrease in the bulk density of the soil of high fertility level from 1.13 ± 0.03 g cm⁻³– 1.32 ± 0.01 g cm⁻³ to 1.06 ± 0.06 g cm⁻³– 1.21 ± 0.11 g cm⁻³. Biochar application contributed to a significant ($p < 0.05$) increase in the water retention capacity (in the range of matrix moisture potentials from –5 kPa to –100 kPa) of the soil of medium fertility level only in May and September. The water retention capacity of the soil of high fertility level at the same matrix potentials insignificantly increased after the biochar application, since the higher content of hydrophilic soil organic matter in the soil also had a significant effect on the size distribution of water-retaining pores. Biochar had a greater effect on the content of macropores than meso- and micropores in both soils. The content of macropores in the studied soils was insignificantly higher in the treatments with biochar than in the control. Nevertheless, significant seasonal changes in moisture content in macropores of the soil of high fertility level were higher than in macropores of the soil of medium fertility level.

Keywords: biochar, soil fertility, soil bulk density, soil water retention capacity.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата влекут за собой увеличение частоты возникновения экстремальных погодных явлений, таких как засухи, высокие температуры воздуха, частые ливни, которые могут привести к нарушению фундаментальных экологических функций почв, снижению их устойчивости к антропогенным воздействиям и потерям урожая сельскохозяйственных культур. Поэтому современные сельскохозяйственные технологии должны быть направлены на длительное сохранение высокой водоудерживающей способности и влагопроводности почв. Стабильно высокие водоудерживающая способность и влагопроводность почв могут увеличить их сопротивление и содействовать восстановлению после неблагоприятных природных и антропогенных воздействий (Basso et al., 2013; Wang et al., 2019). Применение биоугля рассматривается в качестве одного из современных способов достижения и длительного сохранения благоприятного физического и гидрофизического состояния почв за счет увеличения их водоудерживающей способности, влагопроводности, удельной поверхности и объема пор, а также уменьшения плотности сложения почв (Abel et al., 2013).

Биоуголь производится посредством медленного (часы) и быстрого (минуты) пиролиза биомассы без доступа кислорода при температурах 300-900°C (Mohan et al., 2014; Wang et al., 2019). Органическое вещество (содержание >80%) биоугля включает аморфные и кристаллические ароматические структуры, которые обладают кратко- и долговременной устойчивостью к биотической и абиотической минерализации (Keiluweit et al., 2010). Продукт характеризуется меньшим удельным весом твердой фазы и большей удельной поверхностью и пористостью, чем минеральная часть почвы. Поэтому, с одной стороны, применение биоугля способствует уменьшению плотности сложения почвы и обеспечению непрерывности системы влагопроводящих почвенных пор (Sun et al., 2014). С другой стороны, сам биоуголь накапливает и сохраняет почвенную влагу в системе микро-, мезо- и макропор (Basso et al., 2013). При нахождении биоугля в почве её органическое вещество и тонкодисперсная минеральная фаза могут проникать в поры биоугля и уменьшать его удельную поверхность и адсорбционную способность (Wang et al., 2019).

Поскольку свойства биоугля зависят от типа биомассы и условий пиролиза, то он оказывает различное влияние на физические, гидрофизические и физико-химические свойства почв (Burell et al., 2016; Lehmann et al., 2011). Внесение окисленного биоугля, по сравнению с применением «свежего» (неокисленного) биоугля, способствует усилению благоприятных изменений водоудерживающей способности почв за счёт уменьшения плотности их сложения, а также повышению порозности и содержания агрегатов (Abel et al., 2013; Basso et al., 2013). «Свежий» биоуголь может отличаться высокой гидрофобностью из-за наличия в его порах

алифатических органических соединений, препятствующих проникновению влаги в поры и повышению водоудерживающей способности почв (Jeffery et al., 2015). Длительное окисление поверхности биоугля при его контакте с воздухом или водой приводит к удалению гидрофобных органических соединений и увеличению гидрофильности и адсорбционной способности его порового пространства (Lehmann et al., 2011).

Меньшее внимание в современных исследованиях уделяется временным изменениям поверхностных свойств биоугля в почвах. Поэтому для более обоснованного анализа изменений поверхностных свойств биоугля в почве и влияния данных изменений на её физические, гидрофизические и физико-химические свойства необходимы длительные полевые эксперименты.

Задача исследований заключалась в том, чтобы оценить достоверность влияния биоугля на плотность сложения и водоудерживающую способность средне- и высококультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы в течение вегетационного периода.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в мае-сентябре 2019 г. в полевом опыте, заложенном в 2003 г. на территории экспериментальной опытной станции ФГБНУ АФИ (п. Меньково, Гатчинский район, Ленинградская область). Полевой опыт заложен на дерново-подзолистой супесчаной почве, различающейся по степени окультуренности: среднекультуренная почва (СОП) и высококультуренная почва (ВОП). Различия в степени окультуренности почвы оценивались по разному содержанию органического вещества. Средняя и высокая степень окультуренности почвы достигнуты в результате внесения навоза крупного рогатого скота в совокупных дозах 220 т га⁻¹ и 540 т га⁻¹ в 2003–2005 гг. Подробная схема полевого опыта на агрофизическом стационаре представлена в публикации Е. А. Оленченко с соавт. (2012).

Экспериментальные делянки размером 4 м² (2×2 м) были заложены 20 мая 2019 г. на парцеллах с СОП и ВОП, минеральные удобрения в почву не вносились. Схема эксперимента включала следующие варианты в трёхкратной повторности: 1. СОП без биоугля; 2. ВОП без биоугля; 3. СОП с биоуглём в дозе 20 т га⁻¹; 4. ВОП с биоуглём в дозе 20 т га⁻¹. В эксперименте применялись фракции биоугля с размером частиц 0,5–3 см.

В качестве биоугля использовался древесный уголь, изготовленный из отходов берёзы сорта Премиум (берёза 1 класса). Биоуголь произведён посредством быстрого пиролиза при температуре 600°C на предприятии ООО «Файервуд» (Ленинградская область, Госненский район, д. Коркино).

Для исследования водоудерживающей способности почвы её ненарушенные образцы отбирались с помощью стальных цилиндров (объемом 88 см³) в слое 0–5 см на участках с биоуглём и без него. Образцы почвы отбирались в мае, июле, августе и сентябре. После насыщения почвы водой до полной влагоёмкости её водоудерживающая способность

определялась с помощью мембранного пресса (SoilMoisture Equipment Corp.) при потенциалах влаги от -5 , -20 , -30 , -50 и -100 кПа в 4-кратной повторности. После проведения измерений водоудерживающей способности почвы её образцы высушивались при 105°C , далее вычислялась плотность её сложения в цилиндрах. Содержание общего органического углерода в образцах почвы определялось по методу Тюрина (Растворова и др., 1995).

Статистическая обработка результатов включала вычисления значений средних, стандартных отклонений и коэффициентов корреляции Пирсона. Достоверность различий средних значений оценивалась с помощью однофакторного

дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости $(p) \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В течение всего периода наблюдений СОП без биоугля характеризовалась достоверно ($p < 0.05$) более высокой плотностью сложения, чем ВОП без биоугля (табл.). Различия в плотности их сложения объясняются разным содержанием органического углерода в среднекультурной (15 г С кг^{-1} почвы) и высококультурной (28 г С кг^{-1} почвы) почве. Увеличение содержания гидрофильного органического вещества в супесчаных почвах способствует уменьшению степени их уплотнения во время сезонных циклов увлажнения и иссушения.

Таблица. Динамика плотности сложения (г см^{-3}) среднекультурной (СОП) и высококультурной (ВОП) супесчаной дерново-подзолистой почвы в вариантах без биоугля (контроль) и с биоуглём в 2019 г.

Вариант	Дата			
	28.05.19	03.07.19	28.08.19	25.09.19
СОП, контроль	1.37 ± 0.03	1.36 ± 0.05	1.43 ± 0.04	1.37 ± 0.06
СОП + биоуголь	1.10 ± 0.06	1.22 ± 0.07	1.26 ± 0.02	1.21 ± 0.10
ВОП, контроль	1.13 ± 0.03	1.24 ± 0.11	1.32 ± 0.01	1.26 ± 0.03
ВОП + биоуголь	1.08 ± 0.07	1.17 ± 0.12	1.21 ± 0.11	1.06 ± 0.06

Примечание: средние значения плотности сложения почвы \pm стандартные отклонения.

Если рассматривать весь период наблюдений, то внесение биоугля способствовало достоверному ($p < 0.01$) и недостоверному снижению плотности сложения СОП и ВОП соответственно. Менее значимое влияние биоугля на плотность сложения ВОП обусловлено тем, что более высокое содержание в ней гидрофильного органического углерода нивелировало влияние биоугля на её поровое пространство. В целом в вариантах с внесением биоугля показатели плотности сложения обеих почв достоверно не различались. Результаты настоящего исследования подтвердили данные, полученные другими учёными, о достоверном влиянии биоугля на плотность сложения песчаных и супесчаных почв (Baiamonte et al., 2019; de Jesus Duarte et al., 2019).

Биоуголь, произведённый из древесных отходов, характеризуется меньшим удельным весом органической твёрдой фазы ($0.3\text{--}0.5 \text{ г см}^{-3}$) по сравнению с удельным весом минеральной твёрдой фазы (2.6 г см^{-3}) почв лёгкого гранулометрического состава (Burrell et al., 2016). Поэтому внесение биоугля в такие почвы приводит к уменьшению степени их уплотнения во время сезонных циклов иссушения и увлажнения.

Биоуголь также обладает высокой общей пористостью – $57\text{--}75\%$ (Jeffery et al., 2015; Quin et al.,

2014), и поэтому способствует увеличению общей пористости почв, особенно песчаных и супесчаных. Структура порового пространства биоугля состоит из микро-, мезо- и макропор, объёмы которых обусловлены типом биомассы и технологическими условиями её пиролиза. На сегодняшний день не существует единого метода целостной количественной оценки распределения эффективных диаметров пор (Jeffery et al., 2015). Согласно данным Hardie et al. (2014), средний диаметр пор биоугля из древесных отходов, произведённого при температуре 550°C в течение $30\text{--}40$ мин., составляет $7.08\text{--}13.1$ мкм. Тем не менее другие учёные (Major et al., 2012) ранее сообщили, что 95% объёма порового пространства большинства биоуглей представлено микропорами (диаметром менее 0.002 мкм), которые не содержат доступной для растений влаги.

Результаты настоящего исследования показали, что в вариантах без внесения биоугля водоудерживающая способность (при потенциалах влаги от -5 кПа до -100 кПа) ВОП была достоверно ($p < 0.05$) выше по сравнению с СОП только в августе и сентябре (рис. 1 а, б, в, г). Большая общая пористость и большее содержание гидрофильного органического вещества в ВОП обусловили её более высокую водоудерживающую способность.

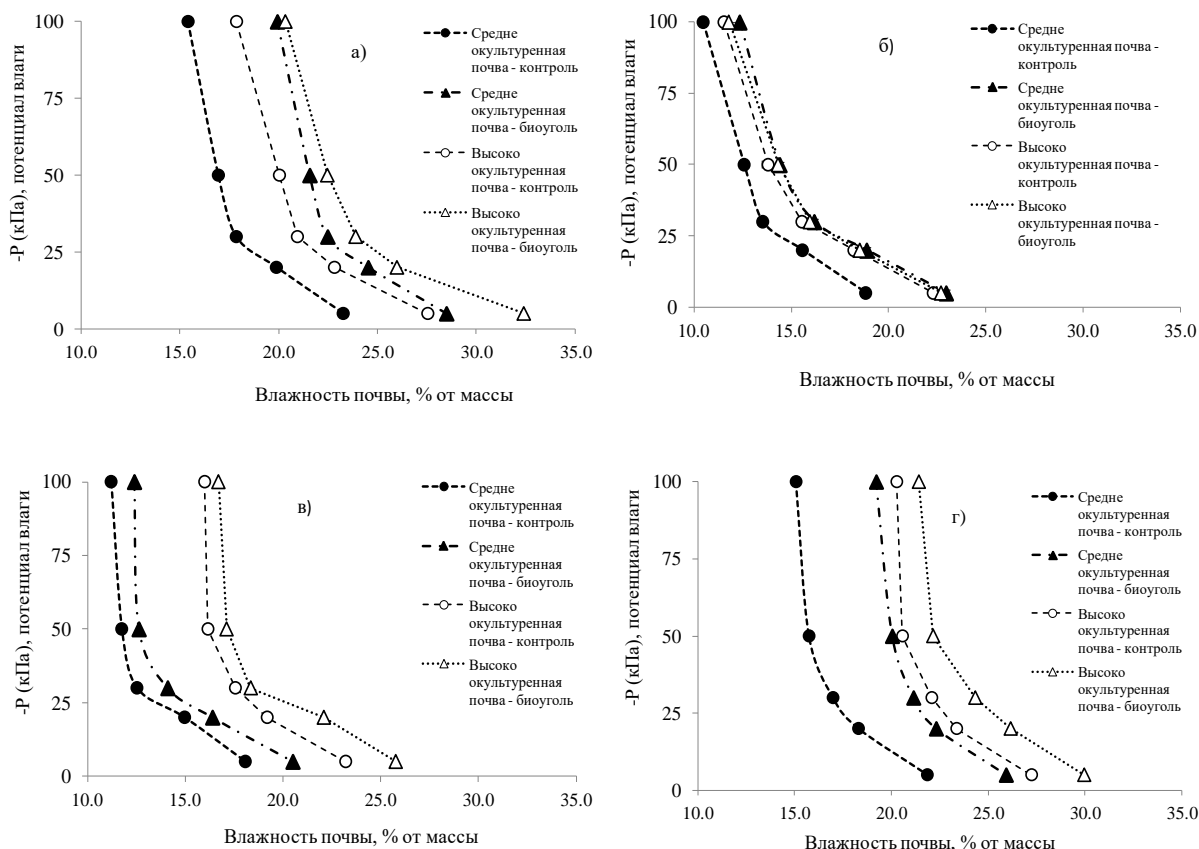


Рис. 1. Водоудерживающая способность среднеокультуренной и высокоокультуренной супесчаной дерново-подзолистой почвы в вариантах без биоугля (контроль) и с биоуглём в мае (а), июле (б), августе (в) и сентябре (г) 2019 г.

Внесение биоугля в дозе 20 т га⁻¹ способствовало достоверному (p<0.05) увеличению водоудерживающей способности СОП только в мае и сентябре. Согласно данным Peake et al. (2014), внесение биоугля в аналогичной дозе привело к достоверному повышению наименьшей влагоёмкости супесчаной почвы.

После внесения биоугля в дозе 20 т га⁻¹ наблюдалось недостоверное увеличение водоудерживающей способности ВОП. Результаты исследований других учёных также подтвердили, что применение биоугля в указанной дозе способствовало недостоверному повышению водоудерживающей способности почв лёгкого гранулометрического состава (Jeffery et al., 2015; Sun et al., 2015). По мнению авторов, доза внесения биоугля 20 т га⁻¹ оказалась недостаточной для достоверного увеличения водоудерживающей способности почв из-за, во-первых, недостоверных изменений плотности их сложения, гидрофильной удельной поверхности и общей пористости и, во-вторых, недостоверно большей водоудерживающей способности самого биоугля по сравнению с почвами.

Сезонные изменения водоудерживающей способности СОП без биоугля проявились в достоверном (p = 0.05) снижении её влажности в диапазоне потенциалов влаги от -5 до -100 кПа в период с мая по июль (в среднем на 4.5% от массы). В период с июля по сентябрь водоудерживающая способность СОП без биоугля недостоверно (в

среднем на 3.4% от массы) увеличилась. Сезонная динамика водоудерживающей способности данной почвы в большей или меньшей степени была обусловлена динамикой содержания макропор (при потенциалах влаги от -5 кПа до -30 кПа) и плотности сложения. Разница между содержанием влаги в макропорах СОП составляла 5.4, 5.3, 5.6 и 4.9% (от массы) в мае, июле, августе и сентябре соответственно. Плотность сложения СОП без биоугля не изменялась с мая по июль, достоверно (p<0.05) повысилась от июля к августу и недостоверно уменьшилась в сентябре (табл.).

Для СОП с биоуглём в целом была характерна аналогичная сезонная динамика водоудерживающей способности. В данном варианте опыта снижение влажности почвы (в среднем на 6.4% от массы) в период с мая по июль было более достоверным (p<0.05) по сравнению с СОП без биоугля. В период с июля по сентябрь произошло недостоверное повышение (в среднем на 4.7% от массы) влажности почвы. Сезонные изменения водоудерживающей способности также были обусловлены сезонными изменениями содержания макропор и плотности сложения. Внесение биоугля в СОП привело к увеличению количества макропор. В результате разница между содержанием влаги в макропорах СОП с биоуглём была больше, чем в СОП без биоугля, и составила 6.0, 6.8, 6.4 и 4.8% (от массы) в мае, июле, августе и сентябре соответственно. Плотность сложения СОП с биоуглём достоверно (p<0.05)

увеличилась от мая к июлю, недостоверно повысилась от июля к августу и недостоверно уменьшилась в сентябре.

Сезонная динамика водоудерживающей способности ВОП без биоугля проявилась в достоверном ($p = 0.05$) уменьшении её влажности (в среднем на 5.6% от массы) от мая к июлю в диапазоне потенциалов влаги от -5 до -100 кПа. В период с июля по сентябрь водоудерживающая способность ВОП без биоугля увеличилась (в среднем на 6.4% от массы) достоверно ($p < 0.05$), СОП без биоугля — недостоверно. Динамика водоудерживающей способности ВОП была связана с динамикой содержания макропор и плотности сложения. Повышение окультуренности почвы с помощью органических удобрений способствует улучшению её физического состояния за счёт увеличения содержания гидрофильного органического вещества. Поэтому для ВОП без биоугля была характерна большая разница между содержанием влаги в макропорах, чем для СОП без биоугля. Она составила 6.6, 6.7, 5.6 и 5.2% (от массы) в мае, июле, августе и сентябре соответственно. В периоды с мая по июль и с июля по август наблюдалось соответственно достоверное ($p = 0.05$) и недостоверное повышение плотности сложения ВОП без биоугля, тогда как в период с августа по сентябрь произошло достоверное ($p < 0.01$) уменьшение плотности её сложения.

Внесение биоугля в ВОП способствовало сохранению вышеупомянутой сезонной динамики её водоудерживающей способности и привело к достоверно ($p < 0.05$ и $p = 0.01$) большему снижению (в среднем на 8.3% от массы) и увеличению (в среднем на 8.1% от массы) содержания влаги в периоды с мая по июль и с июля по сентябрь соответственно. Разница между содержанием влаги в макропорах ВОП с биоуглём была больше по сравнению с ВОП без биоугля и составляла 8.4, 6.7, 7.5 и 5.7% (от массы) в мае, июле, августе и сентябре соответственно. Сезонные изменения плотности сложения ВОП с биоуглём были недостоверными и не оказывали значимого влияния на её водоудерживающую способность.

Биоуголь оказал более существенное влияние на содержание в обеих почвах макропор,

чем мезо- и микропор (в диапазоне потенциалов влаги от -30 до -100 кПа). Разница между содержанием влаги в мезо- и микропорах СОП без биоугля и с биоуглём составляла 1.3–3.0% (от массы) и 1.7–3.9% (от массы). Для ВОП без биоугля и с биоуглём указанная разница варьировалась от 1.6% до 4.0% (от массы) и от 1.6% до 4.2% (от массы).

ВЫВОДЫ

Результаты исследований показали, что внесение биоугля, произведённого из древесных отходов, способствовало достоверному ($p < 0.01$) и недостоверному снижению плотности сложения средне- и высококультуренной почвы. Менее значимое влияние биоугля на плотность сложения высококультуренной почвы обусловлено тем, что более высокое содержание в ней гидрофильного органического углерода оказывало существенное влияние на структуру её порового пространства.

Внесение биоугля привело к достоверному ($p < 0.05$) повышению водоудерживающей способности среднекультуренной почвы только в мае и сентябре. Водоудерживающая способность высококультуренной почвы в результате применения биоугля увеличилась недостоверно по вышеуказанной причине.

Сезонные изменения содержания макропор и плотности сложения обеих почв с биоуглём и без биоугля оказывали влияние на сезонные изменения их водоудерживающей способности в диапазоне потенциалов влаги от -5 до -30 кПа. Внесение биоугля способствовало главным образом увеличению количества макропор в обеих почвах, а также достоверному ($p < 0.01$) и недостоверному уменьшению плотности сложения средне- и высококультуренной почвы. Тем не менее сезонные достоверные уменьшение ($p < 0.05$) и увеличение ($p < 0.01$) содержания влаги в макропорах высококультуренной почвы с биоуглём были более значительными по сравнению со среднекультуренной почвой с биоуглём.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-016-00038-А.

Список литературы

- Оленченко Е. А., Рижия Е. Я., Бучкина Н. П., Балашов Е. В. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на её физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // Агрофизика. 2012. № 4. С. 8–18.
- Растворова О. Г., Андреев Д. П., Гагарина Э. И., Касаткина Г. А., Федорова Н. Н. Химический анализ почв. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1995. 254 с.
- Abel S., Peters A., Trinks S., Schonsky H., Facklam M., Wessolek G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil // Geoderma, 2013, v. 202, pp. 183–191.
- Baiamonte G., Crescimanno G., Parrino F., De Pasquale C. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil // Catena, 2019, v. 175, pp. 294–303.
- Basso A. S., Miguez F. E., Laird 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.

- Burrell L. D., Zehetner F., Rampazzo N., Wimmer B., Soja G. Long-term effects of biochar on soil physical properties // *Geoderma*, 2016, v. 282, pp. 96–102.
- de Jesus Duarte S., Glaser B., Pellegrino Cerri C. E. Effect of biochar particle size on physical, hydrological and chemical properties of loamy and sandy tropical soils // *Agronomy*, 2019, v. 9, 165 p.
- Hardie M., Clothier B., Bound S., Oliver G., Close D. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? // *Plant and Soil*, 2014, v. 376, pp. 347–361.
- Jeffery S., Meinders M. B., Stoof C. R., Bezemer T. M., van de Voorde T. F., Mommer L., van Groenigen J. W. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil // *Geoderma*, 2015, v. 251, pp. 47–54.
- Keiluweit M., Nico P. S., Johnson M. G., Kleber M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) // *Environmental science & technology*, 2010, v. 44, pp. 1247–1253.
- 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, pp. 1812–1836.
- Major J., Steiner C., Downie A., Lehmann J. Biochar effects on nutrient leaching // In: *Biochar for environmental management*. Routledge. 2012, pp. 303–320.
- Mohan D., Sarswat A., Ok Y. S., Pittman Jr C. U. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—a critical review // *Bioresource technology*, 2014, v. 160, pp. 191–202.
- Peake L. R., Reid B. J., Tang X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils // *Geoderma*, 2014, v. 235, pp. 182–190.
- Sun Z., Arthur E., de Jonge L. W., Elsgaard L., Moldrup P. Pore structure characteristics after 2 years of biochar application to a sandy loam field // *Soil Science*, 2015, v. 180, pp. 41–46.
- Wang, D., Li, C., Parikh, S. J., & Scow, K. M. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils—A multi-scale analysis // *Geoderma*, 2019, v. 340, pp. 185–191.

References

- Olenchenko E. A., Rizhiya E. Y., Buchkina N. P., Balashov E. V. Vlijanie stepeni okulturennosti dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvy na ejo fizicheskie svoystva i urozhainost selskokhozjastvennykh kultur v agrofizicheskom stacionare [Effect of fertility of loamy sand Spodosol on its physical properties and crop yield in agrophysical experiment] // *Agrofizika*, 2012, no. 4, pp. 8–18.
- Rastvorova O. G., Andreev D. P., Gagarina E. I., Kasatkina G. A., Fedorova N. N. *Chimicheskii analiz pochv* [Chemical analysis of soils]. Saint-Petersburg, St. Petersburg Publishing House, 1995. 254 p.
- Abel S., Peters A., Trinks S., Schonsky H., Facklam M., Wessolek G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil // *Geoderma*, 2013, v. 202, pp. 183–191.
- Baiamonte G., Crescimanno G., Parrino F., De Pasquale C. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil // *Catena*, 2019, v. 175, pp. 294–303.
- Basso A. S., Miguez F. E., Laird 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.
- Burrell L. D., Zehetner F., Rampazzo N., Wimmer B., Soja G. Long-term effects of biochar on soil physical properties // *Geoderma*, 2016, v. 282, pp. 96–102.
- de Jesus Duarte S., Glaser B., Pellegrino Cerri C. E. Effect of biochar particle size on physical, hydrological and chemical properties of loamy and sandy tropical soils // *Agronomy*, 2019, v. 9, 165 p.
- Hardie M., Clothier B., Bound S., Oliver G., Close D. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? // *Plant and Soil*, 2014, v. 376, pp. 347–361.
- Jeffery S., Meinders M. B., Stoof C. R., Bezemer T. M., van de Voorde T. F., Mommer L., van Groenigen J. W. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil // *Geoderma*, 2015, v. 251, pp. 47–54.
- Keiluweit M., Nico P. S., Johnson M. G., Kleber M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) // *Environmental science & technology*, 2010, v. 44, pp. 1247–1253.
- 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, pp. 1812–1836.
- Major J., Steiner C., Downie A., Lehmann J. Biochar effects on nutrient leaching // In: *Biochar for environmental management*. Routledge. 2012, pp. 303–320.
- Mohan D., Sarswat A., Ok Y. S., Pittman Jr C. U. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—a critical review // *Bioresource technology*, 2014, v. 160, pp. 191–202.
- Peake L. R., Reid B. J., Tang X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils // *Geoderma*, 2014, v. 235, pp. 182–190.
- Sun Z., Arthur E., de Jonge L. W., Elsgaard L., Moldrup P. Pore structure characteristics after 2 years of biochar application to a sandy loam field // *Soil Science*, 2015, v. 180, pp. 41–46.
- Wang, D., Li, C., Parikh, S. J., & Scow, K. M. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils—A multi-scale analysis // *Geoderma*, 2019, v. 340, pp. 185–191.