

УДК 631.421.2:631.847.212:631.89

## ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ И УДОБРЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ И АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ В ВЕГЕТАЦИОННОМ ОПЫТЕ

И. А. Дубровина, М. Г. Юркевич, В. А. Сидорова

Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

В краткосрочном вегетационном опыте изучали отдельное и совместное влияние биоугля и удобрений на песчаной и тяжелосуглинистой дерново-подзолистых почвах на их основные агрохимические свойства, а также рост и развитие ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) сорта Яромир. В опыте использовали древесный биоуголь фракций 3–5 и  $\leq 2$  мм в 5% дозировке (от массы почвы). В качестве удобрений применяли азофоску марки NPK 16:16:16 и препарат азотовит, содержащий живые клетки и споры бактерий *Azotobacter chroococcum*. Исследования показали, что добавление древесного биоугля к дерново-подзолистой песчаной почве вызывает увеличение рН, подвижного калия и фосфора, нитратного азота, а также усиливает линейный рост, повышает продуктивность надземной биомассы ячменя и содержание протеина в зеленой массе. Выраженное синергетическое влияние практически на все параметры оказала фракция биоугля  $\leq 2$  мм совместно с азофоской. Фракция биоугля 3–5 мм совместно с азотовитом вызывала увеличение содержания нитратного азота в почве и сырого протеина в надземной биомассе ячменя. Применение биоугля на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, несмотря на рост рН и подвижного калия и фосфора, вело к сокращению содержания нитратного азота, замедлению роста и развития растений ячменя, а также уменьшению содержания в них протеина. По-видимому, применение биоугля на тяжелых почвах может приводить к созданию условий, способствующих денитрификации. В целом по опыту отмечено увеличение содержания минерального азота в вариантах с биоуглем и азофоской, следовательно, биоуголь в присутствии дополнительного источника азота подвергается усиленной минерализации.

Ключевые слова: биоуголь; азофоска; *Azotobacter chroococcum*; почвенная кислотность; аммонийный и нитратный азот; подвижный фосфор и калий; продуктивность биомассы; сырой протеин.

### I. A. Dubrovina, M. G. Yurkevich, V. A. Sidorova. EFFECT OF BIOCHAR AND FERTILIZERS ON THE DEVELOPMENT OF BARLEY PLANTS AND AGROCHEMICAL INDICES OF SODDY-PODZOLIC SOILS IN A POT EXPERIMENT

The separate and combined effects of biochar and fertilizers in soddy-podzolic sandy and clay loam soils on their basic agrochemical properties, as well as on the growth and development of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) v. Yaromir were studied in a short-term pot experiment. Wood biochar fractions 3–5 and  $\leq 2$  mm in 5% dosage (by weight of soil) were used in the experiment. The fertilizers were NPK 16:16:16 and Azotovit, containing living cells and spores of *Azotobacter chroococcum* bacteria. Studies have shown

that the addition of wood biochar to soddy-podzolic sandy soil causes an increase in pH, available potassium and phosphorus, nitrate nitrogen, as well as enhances barley length growth, increases the aboveground biomass and protein content in it. The  $\leq 2$  mm biochar applied together with NPK pronounced a synergistic effect on almost all parameters. The biochar fraction 3–5 mm together with *Azotobacter* caused an increase of nitrate nitrogen in the soil and raw protein in barley aboveground biomass. Application of biochar to soddy-podzolic clay loam soil, despite an increase in pH and available potassium and phosphorus, led to a reduction in nitrate nitrogen content, slowed down the growth and development of barley plants, and reduced protein content in them. Apparently, the use of biochar on fine textured soils can create the conditions conducive to denitrification. In the experiment in general, we observed an increase in the content of mineral nitrogen in the treatments with biochar and NPK. Hence, in the presence of an additional source of nitrogen, biochar undergoes intensified mineralization.

**Key words:** biochar; NPK fertilizer; *Azotobacter chroococcum*; soil acidity; ammonium and nitrate nitrogen; available phosphorus and potassium; biomass productivity; raw protein.

## Введение

Одним из глобальных вызовов современности является рост потребности в продовольствии при ограниченных площадях плодородных земель. В связи с этим в условиях возрастающей деградации почв ведется поиск новых методов и инструментов управления почвенным плодородием. Так, в последнее десятилетие большое внимание уделяется изучению биоугля, который является перспективным материалом для поддержания устойчивого сельского хозяйства [Singh et al., 2015].

Биоуголь – продукт с высоким содержанием углерода, получаемый путем пиролиза органического сырья без доступа кислорода. Данный процесс преобразует органические материалы в поликонденсированные ароматические и гетероциклические структуры углеродного каркаса, состоящего из крупных и мелких пор [Tan et al., 2017].

Благодаря своим физико-химическим свойствам биоуголь обладает потенциалом для повышения продуктивности и устойчивости агроэкосистем. Его применение вызывает комплексные изменения почвенных свойств, обеспечивающих среду и базу развития растений. Обладая высокой пористостью и низкой насыпной плотностью, биоуголь значительно влияет на водно-физические свойства почв, а также на их агрегатное состояние [Głab et al., 2016; Ajayi, Horn, 2017; Дубровина и др., 2018]. Имея высокую емкость катионного обмена и значительное содержание обменных катионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), биоуголь повышает pH среды и снижает актуальную и обменную кислотность, нейтрализуя токсическое влияние на растения  $\text{Al}^{3+}$  [Zhao et al., 2015; Raboin et al., 2016; Li-li et al., 2017]. Большинство видов биоугля обогаща-

ют почву доступным для растений калием [Liu et al., 2012; Li-li et al., 2017], а также изменяют подвижность почвенных фосфатов [Chintala et al., 2014; Xu et al., 2014; Jiang et al., 2015]. Применение биоугля приводит к изменениям физико-химических показателей почв, что способствует значительному влиянию на бактериальное сообщество, в том числе на бактерии, участвующие в почвенном цикле азота [Gul, Whalen, 2016].

Влияние биоугля на систему «почва – растение» широко варьируется в зависимости от вида и дозировки угля, типа почвы, видов сельскохозяйственных культур, а также климатических условий. Так, значительное увеличение плодородия почвы, роста растений и их урожайности в основном наблюдались при применении биоугля в тропических и субтропических регионах [Mulcahy et al., 2013; Liu et al., 2014; Raboin et al., 2016]. До последнего времени недостаточно изучено влияние биоугля на свойства и продуктивность почв умеренного пояса. Подзолы и дерново-подзолистые почвы бореальной зоны характеризуются кислой реакцией среды, слабой микробиологической активностью и низким естественным плодородием. Теоретически применение биоугля на таких почвах должно способствовать повышению агрохимического фона и улучшению условий для роста и развития растений. Однако различный гранулометрический и химический состав почв может вызывать разные эффекты при применении биоугля. Широко распространенным и доступным вариантом биоугля в лесной зоне является древесный уголь. Так как биоуголь из лигноцеллюлозного сырья характеризуется высокой ароматичностью [Novak et al., 2013], целесообразно его применять в смеси с различными удобрениями,

как традиционными, так и относительно новыми. Например, интерес вызывает применение биоугля совместно с препаратами PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria) [Saxena et al., 2013].

В связи с этим целью работы было исследование отдельного и совместного влияния различных фракций древесного биоугля и удобрений на контрастных по гранулометрическому составу и плодородию дерново-подзолистых почвах на их основные агрохимические свойства, а также на рост и развитие ячменя ярового.

## Материалы и методы

Объектами исследования служили почво-смеси с биоуглем разных фракций (фактор А) и удобрениями (фактор В). Для опыта использовали почвы зоны дерново-подзолистых почв (подзона средней тайги) с двух участков, вовлеченных в сельскохозяйственное использование. Песчаная почва (агрозем альфегумусовый, Корзинский научный стационар): 4,1 % физической глины;  $pH_{KCl}$  – 4,5;  $C_{общ}$  – 1,5 %;  $N_{общ}$  – 0,12 %;  $N-NH_4$  – 8 мг/кг;  $N-NO_3$  – 24 мг/кг;  $P_2O_5$  (по Кирсанову) – 144 мг/кг;  $K^+$  (обменный) – 0,2 смоль экв/кг; сумма обменных оснований – 2,0 смоль экв/кг. Тяжелосуглинистая почва (агрозем текстурно-дифференцированный, Агробиологическая станция): 42,6 % физической глины;  $pH_{KCl}$  – 5,1;  $C_{общ}$  – 2,5 %;  $N_{общ}$  – 0,19 %;  $N-NH_4$  – 12 мг/кг;  $N-NO_3$  – 29 мг/кг;  $P_2O_5$  (по Кирсанову) – 317 мг/кг;  $K^+$  (обменный) – 0,4 смоль экв/кг; сумма обменных оснований – 7,8 смоль экв/кг.

Почву отбирали из верхнего пахотного горизонта 0–20 см, высушивали до воздушно-сухого состояния, растирали и просеивали через сито 5 мм. В вариантах с биоуглем применяли уголь древесный (ГОСТ 7657–84), марка А. Биоуголь имеет следующие характеристики: плотность – 0,37 г/см<sup>3</sup>;  $pH_{H_2O}$  – 9,3;  $pH_{KCl}$  – 7,9; содержание (% в. с. н.): золы – 2,8; С – 81; N – 0,35; K – 0,24; P – 0,026; Ca – 0,83; Mg – 0,20. Уголь размалывали до фракций 3–5 мм и ≤ 2 мм и применяли в дозе 5 % (от массы почвы), основываясь на данных предыдущих исследований [Дубровина и др., 2018; Дубровина, 2019], где 5% дозировка показала наибольшую эффективность. В качестве традиционного удобрения использовали азофоску (АЗФК) марки НРК 16:16:16 (ГОСТ 19691–84) в невысокой дозировке  $N_{40}P_{40}K_{40}$  кг/га д. в. (50 мг удобрения на сосуд). В качестве микробиологического удобрения применяли препарат азотовит, содержащий живые клетки и споры бактерий

*Azotobacter chroococcum* (штамм В-9029), титр 5,09 КОЕ/г. Рабочий раствор – 2 мл раствора на 1 л воды (50 мл раствора на сосуд). Навеску почвы 500 г помещали в вегетационные сосуды объемом 1 л, в варианты с биоуглем вносили уголь в количестве 25 г на сосуд, смачивали, перемешивали и оставляли на 1 неделю. Через неделю в варианты с удобрениями вносили удобрения в жидком виде по схеме предпосевной обработки почвы. Через 2 дня производили посев по 15 штук в сосуд пророщенными семенами ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L., с. Яромир). Опыт проводили при естественном освещении и температуре воздуха 22–23 °С в трехкратной повторности. Для каждой почвы применена следующая схема опыта: 1. Контроль; 2. АЗФК; 3. Азотовит; 4. Биоуголь ≤ 2 мм; 5. Биоуголь ≤ 2 мм + АЗФК; 6. Биоуголь ≤ 2 мм + Азотовит; 7. Биоуголь 3–5 мм; 8. Биоуголь 3–5 мм + АЗФК; 9. Биоуголь 3–5 мм + Азотовит.

В ходе опыта проводили еженедельный учет динамики линейного роста растений. Уборку производили через 40 суток после посева в фазе выхода в трубку. В процессе уборки измеряли вес надземной биомассы и отмытых корней (сырой вес). В высушенной при 105 °С надземной биомассе определяли содержание общего азота по Кьельдалю с использованием Kjeltec system «Tecator». Общий азот пересчитывали на сырой протеин умножением на коэффициент 6,25 [Практикум..., 2001]. После уборки опыта в почве выполняли следующие определения:  $pH_{KCl}$ , содержание аммонийного ( $N-NH_4$ ) и нитратного ( $N-NO_3$ ) азота в свежем образце – потенциометрически с использованием ион-селективных электродов на иономере АНИОН 4100 «Инфраспак-Аналит»; содержание подвижного фосфора ( $P_2O_5$ ) и калия ( $K_2O$ ) по Кирсанову (0,2 н HCl) со спектрофотометрическим окончанием на спектрофотометре UV-1800 «Shimadzu» (фосфор) и атомно-эмиссионным окончанием на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000 «Shimadzu» (калий) [Теория..., 2006; ГОСТ 26951-86].

Для статистической обработки данных применяли двухфакторный дисперсионный анализ (Factorial ANOVA), наименьшую существенную разность ( $HCP_{05}$ ) и корреляционно-регрессионный анализ. В работе использовали пакеты анализа PAST Statistics и Microsoft Excel. Данные по калию получены с использованием оборудования ЦКП «Аналитическая лаборатория» Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

## Результаты

### *Агрохимические показатели почв*

Применение биоугля обеих фракций с высокой степенью статистической достоверности оказывает сильное влияние на уровень рН ( $p < 0,001$ ) и содержание подвижного калия ( $p < 0,001$ ) при низких уровнях случайных отклонений (табл. 1 и 2). Значения рН особенно заметно изменяются в песчаной почве, изначально более кислой. Большой достоверный эффект для обеих почв характерен для мелкой фракции угля (+0,36 и +0,21 при  $HCP_{05} = 0,05$  и 0,03). В целом значения подвижного калия возрастают в среднем в 3 раза в вариантах с биоуглем по сравнению с контролем, как в песчаной, так и в тяжелосуглинистой почве. Обе фракции угля оказывают влияние на повышение содержания калия в почвах, при этом в песчаной сильнее влияет крупная фракция (+0,67 при  $HCP_{05} = 0,37$ ), а в тяжелосуглинистой – мелкая (+1,1 при  $HCP_{05} = 0,89$ ). Синергетическое влияние на содержание калия в тяжелосуглинистой почве оказывает мелкая фракция угля и удобрения ( $p < 0,001$ ).

На уровень подвижного фосфора в обеих почвах оказывают достаточно сильное влияние как уголь ( $p < 0,001$ ), так и удобрения ( $p < 0,001$ ) при невысоких уровнях случайных отклонений (табл. 1 и 2). В песчаной почве удобрение (АЗФК) влияет сильнее (доля влияния фактора 45 %) и увеличивает содержание фосфатов в среднем на 23 мг/кг. Доля влияния биоугля ниже (25 %), и он увеличивает содержание фосфора на 15–19 мг/кг. Синергетический эффект на содержание фосфатов на грани статистической достоверности ( $p = 0,04$ ) наблюдается от совместного применения АЗФК и мелкой фракции биоугля. Обеспеченность фосфатами тяжелосуглинистой почвы примерно в 2,5 раза выше, чем песчаной, и здесь большую долю влияния оказывает биоуголь (45 %) и чуть меньше – удобрения (32 %). Оба удобрения достоверно повышают уровень фосфора на 1,4–2 мг/кг при  $HCP_{05} = 1,18$ . Уровень фосфатов увеличивается в вариантах с углем и удобрениями в среднем на 12–32 мг/кг. Максимальное содержание фосфора также наблюдается в вариантах с удобрениями и мелкой фракцией биоугля, но без статистической достоверности.

Внесение биоугля не оказывает влияния на уровень аммонийного азота в обеих почвах, при этом в песчаной почве велика доля случайных отклонений для данного параметра (табл. 1 и 2). В песчаной почве проявля-

ется синергетический эффект влияния АЗФК и биоугля мелкой фракции ( $p = 0,02$ ) на уровень аммонийного азота. В тяжелосуглинистой почве на содержание  $N-NH_4$  оказывает влияние АЗФК ( $p < 0,001$ ) с долей влияния фактора 50 %. Также существует эффект совместного синергетического влияния мелкой фракции угля и АЗФК ( $p < 0,001$ ). На уровень нитратного азота в обеих почвах оказывают влияние биоуголь ( $p < 0,001$ ), удобрения ( $p < 0,001$ ) и их взаимодействие ( $p < 0,001$ ). В песчаной почве содержание нитратного азота достоверно выше в вариантах с мелким углем и АЗФК, а также с крупным углем и азотовитом. В тяжелосуглинистой почве влияние еще более сложное. Внесение биоугля достоверно снижает содержание нитратного азота на 7,3–8,6 мг/кг при  $HCP_{05} = 1,35$ . При этом внесение АЗФК повышает содержание  $N-NO_3$  на 4 мг/кг при  $HCP_{05} = 1,35$ . Таким образом, наблюдается повышение содержания нитратного азота в вариантах с АЗФК на фоне общего его снижения в вариантах с биоуглем.

### *Морфометрические показатели ячменя*

Скорость линейного роста ячменя на песчаной почве была выше, чем на тяжелосуглинистой, и к концу 3-й недели достигла разницы в 3–5 см практически во всех вариантах. К моменту уборки опыта растения на контрольных вариантах на обеих почвах имели одинаковые значения линейного роста (в среднем 30,8 см). В вариантах с удобрениями (без угля) растения были несколько выше на тяжелосуглинистой почве по сравнению с песчаной (табл. 3 и 4). В вариантах с углем наблюдалась противоположная картина: на песчаной почве растения были выше в вариантах с углем, чем в контрольных (плюс к контролю 1–1,5 см). На тяжелосуглинистой почве, напротив, в вариантах с углем растения были значительно ниже, чем в контроле и в вариантах с удобрениями (минус от контроля 5–8 см).

Показатели урожайности надземной и подземной фитомассы ячменя на разных почвах значительно различаются (табл. 3 и 4). Так, на песчаной почве больший вес имеют варианты с биоуглем (плюс к контролю 0,8–2,8 г/сосуд), особенно мелким, а также вариант с АЗФК. На тяжелосуглинистой почве варианты с углем показывают наименьшие значения (минус от контроля 1,4–2,4 г/сосуд), положительно выделяется также вариант с АЗФК. Фитомасса корней в целом в 3–4 раза выше в песчаной почве по сравнению с тяжелосуглинистой, особенно выделяются варианты с удобрения-

Таблица 1. Статистические показатели агрохимических свойств дерново-подзолистой песчаной почвы  
Table 1. Statistical indicators of agrochemical properties of soddy-podzolic sandy soil

Варианты Variants	pH <sub>KCl</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
		мг/кг почвы mg/kg soil			
Контроль Control					
Контроль Control	4,53 ± 0,01	4,0 ± 0,21	27,0 ± 0,57	132,7 ± 3,18	9,7 ± 0,33
АЗФК NPK (16-16-16)	4,51 ± 0,00	5,0 ± 0,15	31,3 ± 0,88	155,0 ± 0,57	10,7 ± 0,88
Азотовит <i>Azotobacter</i>	4,53 ± 0,00	5,1 ± 0,09	28,0 ± 0,60	134,3 ± 5,46	10,7 ± 0,88
Биоуголь ≤ 2 мм Biochar ≤ 2 mm					
Контроль Control	5,08 ± 0,06	5,0 ± 0,45	30,0 ± 0,57	147,3 ± 2,60	28,0 ± 2,89
АЗФК NPK (16-16-16)	5,02 ± 0,04	<b>5,4 ± 0,33</b>	<b>33,0 ± 0,56</b>	<b>171,3 ± 4,70</b>	28,0 ± 2,31
Азотовит <i>Azotobacter</i>	5,02 ± 0,00	4,5 ± 0,28	31,1 ± 0,65	148,0 ± 3,06	22,7 ± 0,33
Биоуголь 3–5 мм Biochar 3–5 mm					
Контроль Control	4,68 ± 0,01	5,0 ± 0,30	29,0 ± 0,51	151,7 ± 1,33	28,0 ± 2,31
АЗФК NPK (16-16-16)	4,70 ± 0,01	4,9 ± 0,03	29,0 ± 0,57	153,3 ± 1,67	30,7 ± 2,60
Азотовит <i>Azotobacter</i>	4,66 ± 0,02	4,4 ± 0,27	<b>32,0 ± 0,80</b>	143,3 ± 5,17	30,0 ± 4,04
Доля влияния фактора, % / Уровень значимости p The percentage of factor, % / p-value					
Биоуголь Biochar	96,3 / <0,001	3,8 / 0,48	26,1 / <0,001	25,9 / <0,001	84,6 / <0,001
Удобрение Fertilizer	0,3 / 0,42	13,1 / 0,10	24,8 / <0,001	45,1 / <0,001	2,7 / 0,10
Взаимодействие Interaction	0,6 / 0,47	37,4 / 0,02	30,8 / <0,001	12,1 / 0,04	3,5 / 0,18
Случайные отклонения Random deviations	2,8	45,7	18,3	16,9	9,2
<i>HCP</i> <sub>05</sub> <i>LSD</i> <sub>05</sub>					
Частных средних Partial mean	0,08	–	1,61	10,4	6,5
Факторов Factor	0,05	–	1,06	5,9	3,7

Примечание. Здесь и далее в таблицах представлены данные среднего арифметического ± ошибка среднего при n=3. Жирным шрифтом выделены показатели, испытывающие эффект совместного влияния факторов А и В.

Note. Here and further data of mean ± standard error with n=3 are presented in the tables. The indicators exposed to the joint influence of factors A and B are given in bold.

ми (плюс к контролю 1,6–2,1 г/сосуд), независимо от внесения угля. На тяжелосуглинистой почве не наблюдается выраженной динамики роста корней в ответ на применение удобрений и биоугля.

Дисперсионный анализ показал, что в опыте на песчаной почве достоверно влияние мелкой фракции биоугля на увеличение показателей линейного роста (p = 0,01) и урожайность зеленой массы (p = 0,001). На содержание сырого

протеина в надземной фитомассе достоверно влияет крупная фракция угля (p < 0,001), а также отмечено взаимное влияние крупного угля и азотовита на увеличение содержания протеина (p = 0,02). АЗФК, в отличие от азотовита, оказывает достоверное влияние на рост зеленой массы (p < 0,001) и массы корней (p < 0,001). В тяжелосуглинистой почве внесение биоугля оказывает достоверное отрицательное влияние на линейный рост (p < 0,001),

Таблица 2. Статистические показатели агрохимических свойств дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы

Table 2. Statistical indicators of agrochemical properties of soddy-podzolic clay loam soil

Варианты Variants	рН <sub>КСІ</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
		мг/кг почвы mg/kg soil			
Контроль Control					
Контроль Control	5,21 ± 0,01	3,0 ± 0,12	30,0 ± 0,57	327,0 ± 9,54	52,7 ± 3,75
АЗФК NPK (16-16-16)	5,19 ± 0,01	4,4 ± 0,21	39,0 ± 0,58	342,7 ± 3,53	78,0 ± 7,51
Азотовит <i>Azotobacter</i>	5,14 ± 0,01	3,1 ± 0,06	29,9 ± 0,27	331,7 ± 3,53	56,0 ± 1,15
Биоуголь ≤ 2 мм Biochar ≤ 2 mm					
Контроль Control	5,62 ± 0,01	3,6 ± 0,05	23,5 ± 0,29	339,0 ± 1,53	157,7 ± 10,1
АЗФК NPK (16-16-16)	5,57 ± 0,00	<b>3,7 ± 0,05</b>	<b>25,5 ± 0,28</b>	371,0 ± 0,58	<b>171,0 ± 8,08</b>
Азотовит <i>Azotobacter</i>	5,59 ± 0,03	3,4 ± 0,06	24,0 ± 0,58	362,7 ± 3,61	<b>173,0 ± 1,15</b>
Биоуголь 3–5 мм Biochar 3–5 mm					
Контроль Control	5,37 ± 0,03	3,6 ± 0,06	25,3 ± 0,44	331,7 ± 2,18	169,7 ± 1,45
АЗФК NPK (16-16-16)	5,37 ± 0,00	<b>3,8 ± 0,07</b>	<b>26,5 ± 0,29</b>	345,0 ± 2,00	140,7 ± 0,33
Азотовит <i>Azotobacter</i>	5,39 ± 0,02	3,4 ± 0,12	25,0 ± 0,57	345,3 ± 1,45	158,7 ± 0,88
Доля влияния фактора, % / Уровень значимости p The percentage of factor, % / p-value					
Биоуголь Biochar	96,6 / <0,001	1,0 / 0,47	68,2 / <0,001	45,2 / <0,001	93,3 / <0,001
Удобрение Fertilizer	0,5 / 0,11	50,3 / <0,001	16,8 / <0,001	32,7 / <0,001	0,1 / 0,73
Взаимодействие Interaction	1,1 / 0,07	37,0 / <0,001	13,1 / <0,001	7,7 / 0,09	4,3 / <0,001
Случайные отклонения Random deviations	1,8	11,7	1,9	14,4	2,3
<i>HCP</i> <sub>05</sub> <i>LSD</i> <sub>05</sub>					
Частных средних Partial mean	0,05	0,29	1,35	11,8	15,4
Факторов Factor	0,03	0,17	0,78	6,8	8,9

мелкая фракция угля снижает данный показатель на 1,9 см при  $HCP_{05} = 1,53$ . Применение АЗФК несколько повышает линейный рост ( $p = 0,03$ ), но взаимодействия факторов не выявлено. Обе фракции биоугля одинаково отрицательно влияют на урожайность надземной фитомассы ( $p < 0,001$ ), но АЗФК по сравнению с азотовитом достоверно увеличивает зеленую массу ( $p = 0,002$ ), и в вариантах с мелким углем выявлено их совместное влияние ( $p = 0,04$ ). В тяжелосуглинистой почве не выявлено факторов, достоверно влияющих на рост корней.

На содержание сырого протеина отрицательно влияет крупная фракция угля ( $p = 0,003$ ).

### Обсуждение

Внесение биоугля в почву сопровождается изменением многих параметров почвенного плодородия, непосредственно влияющих на рост и развитие растений. Данные изменения обусловлены как прямыми, так и косвенными эффектами применения угля. Так, сдвиг почвенной кислотности при применении биоугля

Таблица 3. Статистические показатели роста и развития ячменя на дерново-подзолистой песчаной почве  
 Table 3. Statistical indicators of growth and development of barley on soddy-podzolic sandy soil

Варианты Variants	Линейный рост, см Linear growth, cm	Сырая биомасса побегов, г/сосуд Raw shoots biomass, g/pot	Сырая биомасса корней, г/сосуд Raw roots biomass, g/pot	Сырой протеин, % а. с. н. Raw protein, % a. d. w.
Контроль Control				
Контроль Control	30,8 ± 0,52	4,30 ± 0,19	2,66 ± 0,10	10,4 ± 0,78
АЗФК NPK (16-16-16)	30,5 ± 0,53	6,29 ± 0,29	4,77 ± 0,77	20,3 ± 2,57
Азотовит <i>Azotobacter</i>	28,1 ± 0,87	4,53 ± 0,42	2,69 ± 0,17	12,2 ± 2,67
Биоуголь ≤ 2 мм Biochar ≤ 2 mm				
Контроль Control	32,6 ± 0,87	6,17 ± 0,60	3,74 ± 0,35	20,1 ± 2,23
АЗФК NPK (16-16-16)	31,6 ± 0,84	7,06 ± 0,45	4,51 ± 0,34	18,2 ± 1,83
Азотовит <i>Azotobacter</i>	32,0 ± 0,20	6,30 ± 0,56	3,82 ± 0,69	18,9 ± 1,62
Биоуголь 3–5 мм Biochar 3–5 mm				
Контроль Control	29,9 ± 0,38	5,13 ± 0,23	4,00 ± 0,25	19,8 ± 1,39
АЗФК NPK (16-16-16)	31,5 ± 1,56	5,99 ± 0,35	4,28 ± 0,67	19,2 ± 1,39
Азотовит <i>Azotobacter</i>	31,7 ± 0,98	6,12 ± 0,34	3,06 ± 0,37	<b>21,7 ± 0,97</b>
Доля влияния фактора, % / Уровень значимости <i>p</i> The percentage of factor, % / <i>p</i> -value				
Биоуголь Biochar	29,6 / 0,01	33,6 / 0,001	8,6 / 0,16	32,8 / <0,001
Удобрение Fertilizer	2,3 / 0,64	25,0 / <0,001	38,6 / <0,001	5,3 / 0,27
Взаимодействие Interaction	23,7 / 0,09	10,6 / 0,23	15,1 / 0,17	28,4 / 0,02
Случайные отклонения Random deviations	44,4	30,8	37,7	33,5
$HCP_{05}$ $LSD_{05}$				
Частных средних Partial mean	2,37	1,20	1,19	5,44
Факторов Factor	1,37	0,70	0,69	3,14

описан рядом авторов [Jien, Wang, 2013; Zhao et al., 2015; Raboin et al., 2016; Dai et al., 2017]. Данный эффект наиболее проявлен на кислых почвах и связан с особенностями угля как мелиоранта с высокой обменной емкостью, щелочным pH и содержащего обменные основания. Биоуголь вносит существенный вклад в обогащение почвы калием [Liu et al., 2012; Li-li et al., 2017]. Исследуемый уголь содержит около 0,24 % калия (по массе), что обеспечивает прибавку калия в 60 мг/кг. В песчаной почве содержание калия возрастает на 12–20 мг/кг

в вариантах с углем, причем АЗФК не вносит значительный вклад в баланс калия. Таким образом, можно предположить, что в песчаной почве основной привнос калия происходит с биоуглем. В тяжелосуглинистой почве в вариантах с углем содержание калия увеличивается на 60–110 мг/кг и наблюдается синергетическое влияние мелкой фракции угля и удобрений на уровень подвижного калия. Возможно, данный прирост объясняется особенностями минералогического состава тяжелосуглинистой почвы, где внесение удобрений и измене-

Таблица 4. Статистические показатели роста и развития ячменя на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве

Table 4. Statistical indicators of growth and development of barley on soddy-podzolic clay loam soil

Варианты Variants	Линейный рост, см Linear growth, cm	Сырая биомасса побегов, г/сосуд Raw shoots biomass, g/pot	Сырая биомасса корней, г/сосуд Raw roots biomass, g/pot	Сырой протеин, % а. с. н. Raw protein, % a. d. w.
Контроль Control				
Контроль Control	30,8 ± 1,76	4,61 ± 0,42	0,96 ± 0,19	20,2 ± 0,33
АЗФК NPK (16-16-16)	32,9 ± 1,29	7,55 ± 1,26	0,94 ± 0,19	21,4 ± 1,59
Азотовит <i>Azotobacter</i>	28,3 ± 1,16	4,33 ± 0,15	0,82 ± 0,21	20,4 ± 0,76
Биоуголь ≤ 2 мм Biochar ≤ 2 mm				
Контроль Control	22,6 ± 0,62	2,25 ± 0,32	0,94 ± 0,12	17,5 ± 0,43
АЗФК NPK (16-16-16)	23,9 ± 0,19	<b>3,10 ± 0,26</b>	1,21 ± 0,08	19,0 ± 0,78
Азотовит <i>Azotobacter</i>	23,4 ± 0,33	2,41 ± 0,05	1,07 ± 0,20	18,1 ± 0,42
Биоуголь 3–5 мм Biochar 3–5 mm				
Контроль Control	25,1 ± 0,32	2,95 ± 0,11	1,07 ± 0,05	17,2 ± 2,28
АЗФК NPK (16-16-16)	25,9 ± 0,46	<b>3,26 ± 0,29</b>	1,21 ± 0,09	16,6 ± 0,72
Азотовит <i>Azotobacter</i>	24,7 ± 0,49	2,82 ± 0,05	0,94 ± 0,01	16,0 ± 1,93
Доля влияния фактора, % / Уровень значимости <i>p</i> The percentage of factor, % / <i>p</i> -value				
Биоуголь Biochar	76,7 / <0,001	57,5 / <0,001	12,2 / 0,23	45,2 / 0,003
Удобрение Fertilizer	5,9 / 0,03	15,4 / 0,002	12,3 / 0,22	2,2 / 0,68
Взаимодействие Interaction	4,7 / 0,21	11,2 / 0,04	7,8 / 0,72	2,8 / 0,91
Случайные отклонения Random deviations	12,7	15,9	67,7	49,9
<i>HCP</i> <sub>05</sub> <i>LSD</i> <sub>05</sub>				
Частных средних Partial mean	2,66	1,42	–	3,66
Факторов Factor	1,53	0,82	–	2,12

ние pH среды приводит к большей подвижности калия минералов группы гидрослюдов [Жарикова, 2008; Сатишур и др., 2010].

Внесение в почвы биоугля оказывает различное влияние на динамику фосфора, в зависимости от начального его содержания в почве, а также сорбционной емкости почвы и угля [Vornø et al., 2018]. Валовое содержание фосфатов в исследуемом биоугле составляет около 0,026 % (по массе). Увеличение количества фосфатов в вариантах с углем составило

в среднем 15 мг/кг, и скорее всего, их прямое внесение оказывает незначительное влияние на прирост подвижного фосфора в почве. При изначально более низком уровне содержания фосфора в песчаной почве больший вклад вносит удобрение, а биоуголь дополнительно увеличивает подвижность фосфатов за счет роста pH среды [Chintala et al., 2014]. Обеспеченность фосфатами и емкость поглощения тяжелосуглинистой почвы выше, чем песчаной, и здесь наблюдается более сильное влияние биоугля

на содержание подвижного фосфора. Данный эффект выше в вариантах с мелкой фракцией угля и большим содержанием Р (варианты с удобрением) – до плюс 30 мг/кг к контролю. В данном случае нельзя исключать совместного влияния механизмов мобилизации почвенных фосфатов. Так, основными эффектами, влияющими на содержание фосфора в почве при применении биоугля, являются увеличение его подвижности в связи с ростом pH среды и уменьшение сорбционной способности почвы для анионов, в том числе фосфатов [Xu et al., 2014; Jiang et al., 2015]. Отмечается также сдвиг в составе микробного сообщества и увеличение количества групп бактерий, солибилизирующих почвенные фосфаты [Liu et al., 2017].

В отличие от калия и фосфора, имеющих положительный рост при внесении биоугля в обеих почвах, для минерального азота наблюдается более сложная картина. В нашем опыте на песчаной почве для форм минерального азота проявилась динамика, в целом характерная для дерново-подзолистых почв [Завьялова и др., 2014; Володина, Левченкова, 2017]. При установлении оптимальных температуры и влажности происходит усиление нитрифицирующей способности почв, содержание аммонийного азота несколько сокращается за счет его быстрого окисления и нитрификации до нитратов, при этом в вариантах с биоуглем содержание нитратного азота достоверно выше. В тяжелосуглинистой почве похожая динамика наблюдалась в вариантах без добавления биоугля. В вариантах с углем отмечено сокращение содержания нитратного азота до минус 6–13 мг/кг от контроля, что характеризует уголь в тяжелосуглинистой почве как ингибитор нитрификации. Основными механизмами изменения цикла азота в почвах, обогащенных биоуглем, являются повышение сорбционной емкости почвы, а также изменение таких почвенных характеристик, как pH и водно-физические свойства, которые опосредованно влияют на состав почвенного бактериального сообщества. Так, в почвах легкого гранулометрического состава биоуголь зачастую создает более благоприятные условия для нитрификаторов [Zheng et al., 2013; Zhao et al., 2014; Cao et al., 2019]. Почвы тяжелого гранулометрического состава исследуются в этом вопросе гораздо реже. Некоторыми исследователями отмечено, что при добавлении к ним биоугля, особенно в высоких дозировках, повышается водоудерживающая способность почв и создаются анаэробные условия, благоприятные для денитрификации и потерь нитратного азота [Бучкина и др., 2017; Li et al., 2018], что подтверждают

наши исследования. В опыте отмечено увеличение содержания нитратного и аммонийного азота в вариантах с углем и АЗФК, в основном проявляется их синергетическое влияние. Поскольку древесный биоуголь характеризуется высокой степенью ароматичности и структурности, то обычно низкая активность его минерализации в почве усиливается при добавлении азотных удобрений [Sadaf et al., 2017].

В целом следует отметить большую степень влияния АЗФК по сравнению с азотовитом на показатели азота и фосфора, а также линейный рост и продуктивность ячменя. Отмечено лишь синергетическое влияние крупной фракции угля и азотовита на содержание нитратного азота в почве и сырого протеина в надземной биомассе ячменя в опыте на песчаной почве. Биоуголь рассматривается некоторыми исследователями как перспективный носитель для инокуляции PGPR, который обеспечивает лучшую выживаемость бактерий [Hale et al., 2014]. В данном варианте, возможно, создались наиболее благоприятные условия для развития *Azotobacter*, который, как известно, способствует лучшей ассимиляции азота растениями [Соколова и др., 2009].

Масса корневой системы гораздо выше в песчаной почве, где на нее также оказывает положительное влияние АЗФК. На урожайность подземной массы не выявлено прямого влияния биоугля в обеих почвах, данный показатель скорее обусловлен физическими свойствами почв. На песчаной почве внесение биоугля положительно сказалось на линейном росте и продуктивности надземной биомассы ячменя, а также содержания протеина в зеленой массе. Несмотря на то что в тяжелосуглинистой почве зафиксирован значительно более высокий агрохимический фон, в вариантах с биоуглем отмечена самая низкая продуктивность растений ячменя и пониженное содержание протеина. Скорее всего, это обусловлено снижением количества доступного для растений азота в условиях конкуренции с почвенной биотой. По данным опыта, урожайность надземной биомассы находится в сильной прямой корреляции с содержанием нитратного азота в почве (рис.). Также возможно отрицательное влияние на растения продуктов аммонификации в условиях режима слабой аэрации корневой системы [Банкина, 2006].

## Заключение

В ходе краткосрочного вегетационного опыта было установлено, что добавление древесного биоугля в количестве 5 % (по мас-

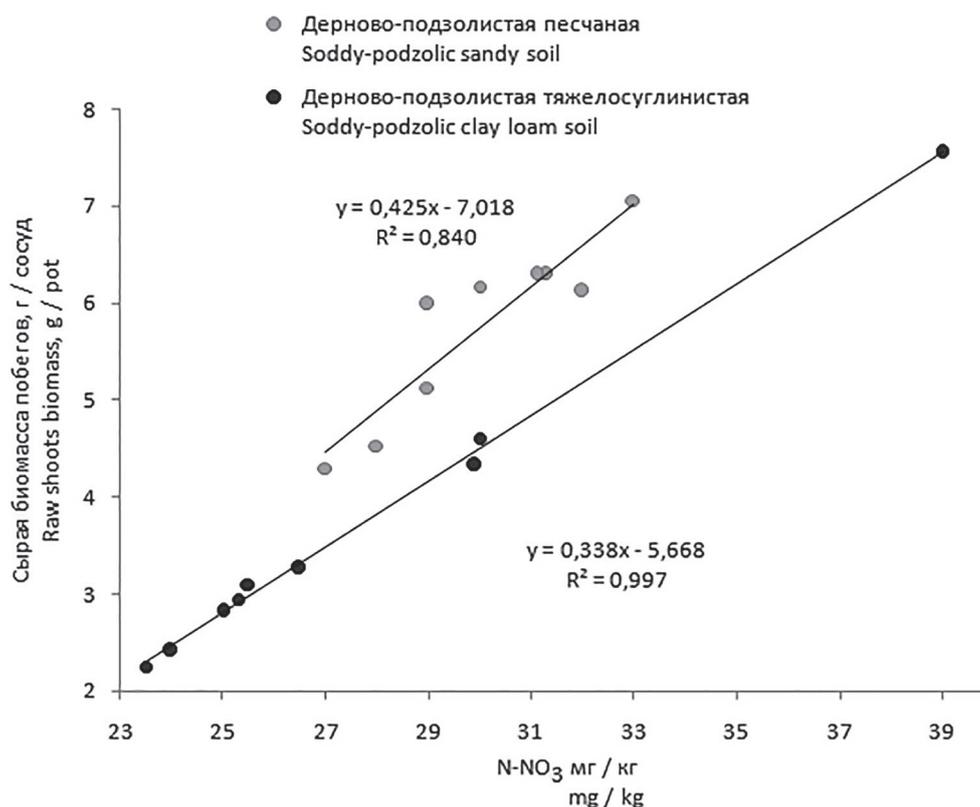


Диаграмма рассеивания, уравнение регрессии и коэффициент детерминации зависимости урожайности надземной биомассы ячменя от содержания нитратного азота в вариантах опыта

Scatter plot, regression equation, and determination coefficient of the dependence of barley aboveground biomass yield on nitrate nitrogen content in the variants of the experiment

се) к дерново-подзолистой песчаной почве вызывает снижение почвенной кислотности, увеличивает содержание подвижного калия и фосфора, нитратного азота, а также усиливает линейный рост, повышает продуктивность надземной биомассы ячменя и содержания протеина в зеленой массе. Наиболее выраженное синергетическое влияние практически на все параметры оказала мелкая фракция угля совместно с АЗФК. Применение крупной фракции биоугля с азотовитом вызвало увеличение содержания нитратного азота в почве и сырого протеина в надземной биомассе ячменя. Применение той же дозировки биоугля на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, несмотря на рост рН, подвижного калия и фосфора, вызывает ингибирование нитрификации, что ведет к сокращению содержания нитратного азота. Следствием является замедление роста и развития растений ячменя, а также сокращение содержания в них протеина. В целом по опыту можно отметить увеличение содержания минерального азота в вариантах с биоуглем и АЗФК в невысокой дозировке, следовательно, биоуголь в присутствии допол-

нительного источника азота подвергается усиленной минерализации. Таким образом, биоуголь хорошо себя зарекомендовал как источник элементов питания и мелиорант на легких и изначально бедных по плодородию песчаных почвах, особенно в смеси с невысокими дозами АЗФК. Крупная фракция биоугля, возможно, создает благоприятные условия для колонизации PGPR, что требует дальнейших исследований. На тяжелых почвах применение биоугля может привести к созданию условий, способствующих денитрификации. Данный эффект наиболее вероятен в условиях избыточного увлажнения при применении высоких дозировок угля.

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0079).*

## Литература

Банкина Т. А. Оптимизация цикла азота в дерново-подзолистых почвах агроценозов // Вестник

Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2006. № 1. С. 168–176.

Бучкина Н. П., Балашов Е. В., Шимански В., Игаз Д., Хорак Я. Изменение биологических и физических параметров почв разного гранулометрического состава после внесения биоугля // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52, № 3. С. 471–477. doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.471rus

Володина Т. И., Левченкова А. Н. Особенности поведения минерального азота в дерново-подзолистой супесчаной почве под влиянием различных систем удобрения // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 2(26). С. 20–31.

ГОСТ 26951–86. Определение нитратов ионометрическим методом [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023499> (дата обращения: 22.04.2019).

Дубровина И. А., Юркевич М. Г., Сидорова В. А., Богданова Т. В. Влияние различных фракций и дозировок биоугля на некоторые агрофизические свойства дерново-подзолистых почв // Принципы экологии. 2018. № 4. С. 77–88. doi: 10.15393/j1.art.2018.8082

Дубровина И. А. Динамика физико-химических свойств дерново-подзолистых почв при внесении биоугля // Проблемы агрохимии и экологии. 2019. № 2. С. 19–23. doi: 10.26178/АЕ.2019.51.56.004

Жарикова Е. А. Изменение калийного состояния некоторых почв Приморья при внесении калийных удобрений и извести // Агрохимия. 2008. № 8. С. 13–19.

Завьялова Н. Е., Косолапова А. И., Сторожева А. Н. Влияние возрастающих доз полного минерального удобрения на органическое вещество и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья // Агрохимия. 2014. № 6. С. 20–28.

Практикум по агрохимии / Ред. В. Г. Минеев. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.

Сатишур В. А., Германович Т. М., Поплетеева Р. Б., Чопчиц Г. С., Евсеенко Г. А. Влияние известкования на содержание форм калия в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // Почвоведение и агрохимия. 2010. № 1(44). С. 99–111.

Соколова М. Г., Акимова Г. П., Хуснидинов Ш. К. Эффективность применения биопрепаратов ассоциативных бактерий на различных овощных культурах // Агрохимия. 2009. № 7. С. 54–59.

Теория и практика химического анализа почв / Ред. Л. А. Воробьева. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

Ajayi A. E., Horn R. Biochar-induced changes in soil resilience: Effects of soil texture and biochar dosage // Pedosphere. 2017. Vol. 27(2). P. 236–247. doi: 10.1016/S1002-0160(17)60313-8

Bornø M. L., Müller-Stöver D. S., Liu F. Contrasting effects of biochar on phosphorus dynamics and bioavailability in different soil types // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 627. P. 963–974. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.283

Cao H., Ning L., Xun M., Feng F., Li P., Yue S., Song J., Zhang W., Yang H. Biochar can increase nitrogen use efficiency of *Malus hupehensis* by modulating nitrate reduction of soil and root // Appl. Soil Ecol. 2019. Vol. 135. P. 25–32. doi: 10.1016/j.apsoil.2018.11.002

Chintala R., Schumacher T. E., McDonald L. M., Clay D. E., Malo D. D., Papiernik S. K., Clay S., Julson J. L. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures // Clean: Soil, Air, Water. 2014. Vol. 42(5). P. 626–634. doi: 10.1002/cle.201300089

Dai Z., Zhang X., Tang C., Muhammad N., Wu J., Brookes P. C., Xu J. Potential role of biochars in decreasing soil acidification – A critical review // Sci. Total Environ. 2017. Vol. 581–582. P. 601–611. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.169

Głąb T., Palmowska J., Zaleski T., Gondek K. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil // Geoderma. 2016. Vol. 281. P. 11–20. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.06.028

Gul S., Whalen J. K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils // Soil Biology & Biochemistry. 2016. Vol. 103. P. 1–15. doi: 10.1016/j.soilbio.2016.08.001

Hale L., Luth M., Kenney R., Crowley D. Evaluation of pinewood biochar as a carrier of bacterial strain *Enterobacter cloacae* UW5 for soil inoculation // Appl. Soil Ecol. 2014. Vol. 84. P. 192–199. doi: 10.1016/j.apsoil.2014.08.001

Jiang J., Yuan M., Xu R., Bish D. L. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws // Soil Till. Res. 2015. Vol. 146. P. 139–147. doi: 10.1016/j.still.2014.10.009

Jien S.-H., Wang C.-S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil // Catena. 2013. Vol. 110. P. 225–233. doi: 10.1016/j.catena.2013.06.021

Li S., Zhang Y., Yan W., Shangguan Z. Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil // Soil Till. Res. 2018. Vol. 183. P. 100–108. doi: 10.1016/j.still.2018.06.006

Li-li H., Zhe-ke Z., Hui-min Y. Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers // J. Integr. Agr. 2017. Vol. 16(3). P. 704–712. doi: 10.1016/S2095-3119(16)61420-X

Liu J., Schulz H., Brandl S., Miehtke H., Huwe B., Glaser B. Short term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2012. Vol. 175. P. 698–707. doi: 10.1002/jpln.201100172

Liu S., Meng J., Jiang L., Yang X., Lan Y., Cheng X., Chen W. Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types // Appl. Soil Ecol. 2017. Vol. 116. P. 12–22. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.03.020

Liu Z., Chen X., Jing Y., Li Q. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil // Catena. 2014. Vol. 123. P. 45–51. doi: 10.1016/j.catena.2014.07.005

Mulcahy D. N., Mulcahy D. L., Dietz D. Biochar soil amendment increases tomato seeding resistance to drought in sandy soils // J. Arid Environ. 2013. Vol. 88. P. 222–225. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.07.012

Novak J. M., Cantrell K. B., Watts D. W. Compositional and thermal evaluation of lignocellulosic and poultry litter chars via high and low temperature pyrolysis // *BioEnergy Research*. 2013. Vol. 6. P. 114–130. doi: 10.1007/s12155-012-9228-9

Raboin L.-M., Razafimahafaly A. H. D., Rabenjari-soa M. B., Rabary B., Dusserre J., Becquer T. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar // *Field Crop. Res.* 2016. Vol. 199. P. 99–108. doi: 10.1016/j.fcr.2016.09.005

Sadaf J., Shah G. A., Shahzad K., Ali N., Shahid M., Ali S., Hussain R. A., Ahmed Z. I., Traore B., Ismail I. M. I., Rashid M. I. Improvements in wheat productivity and soil quality can accomplish by co-application of biochars and chemical fertilizers // *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 607–608. P. 715–724. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.178

Saxena J., Rana G., Pandey M. Impact of addition of biochar along with *Bacillus* sp. on growth and yield of French beans // *Scientia Horticulturae*. 2013. Vol. 162. P. 351–356. doi: 10.1016/j.scienta.2013.08.002

Singh R., Babu J. N., Kumar R., Srivastava P., Singh P., Raghubanshi A. S. Mul-tifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agri-

culture: an ecological perspective // *Ecol. Eng.* 2015. Vol. 77. P. 324–347. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.011

Tan Z., Lin C. S. K., Ji X., Rainey T. J. Returning biochar to fields: A review // *Appl. Soil Ecol.* 2017. Vol. 116. P. 1–11. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.03.017

Xu G., Sun J., Shao H., Chang S. X. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity // *Ecol. Eng.* 2014. Vol. 62. P. 54–60. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.10.027

Zhao R., Coles N., Kong Z., Wu J. Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions // *Soil Till. Res.* 2015. Vol. 146. P. 133–138. doi: 10.1016/j.still.2014.10.014

Zhao X., Wang S., Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies // *J. Soil. Sediment.* 2014. Vol. 14. P. 471–482. doi: 10.1007/s11368-013-0803-2

Zheng H., Wang Z., Deng X., Herbert S., Xing B. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bio-availability in agricultural soil // *Geoderma*. 2013. Vol. 206. P. 32–39. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.018

Поступила в редакцию 21.05.2019

## References

Bankina T. A. Optimizatsiya tsikla azota v derno-vo-podzolistykh pochvakh agrotsenozov [Optimization of a nitrogen cycle in paddy-podzolic soils of agrocenoses]. *Vestnik Sankt-Peterburg. univ. Ser. 3. Biol.* [Vestnik of St. Petersburg Univ. Ser. 3. Biol.]. 2006. No. 1. P. 168–176.

Buchkina N. P., Balashov E. V., Shimanski V., Igaz D., Khorak Ya. Izmenenie biologicheskikh i fizicheskikh parametrov pochv raznogo granulometricheskogo sostava posle vneseniya biouglya [Changes in biological and physical parameters of soils with different texture after biochar application]. *Sel'skokhoz. biol.* [Agricultural Biol.]. 2017. Vol. 52, no. 3. P. 471–477. doi: 10.15389/agrobiol.2017.3.471rus

Dubrovina I. A., Yurkevich M. G., Sidorova V. A., Bogdanova T. V. Vliyanie razlichnykh fraktsii i dozirovok biouglya na nekotorye agrofizicheskie svoystva derno-vo-podzolistykh pochv [Impact of different fractions and dosages of biochar on some agrophysical properties of soddy-podzolic soils]. *Printsiipy ekol.* [Principles Ecol.]. 2018. No. 4. P. 77–88. doi: 10.15393/j1.art.2018.8082

Dubrovina I. A. Dinamika fiziko-khimicheskikh svoystv derno-vo-podzolistykh pochv pri vnesenii biouglya [Dynamics of physicochemical properties of soddy-podzolic soils under the application of biochar]. *Probl. agrokhimii i ekol.* [Agrochem. and Ecol. Problems]. 2019. No. 2. P. 19–23. doi: 10.26178/AE.2019.51.56.004

GOST 26951–86. Opredelenie nitratov ionometri-cheskim metodom [State standard 26951–86. Determination of nitrates by the potentiometric method]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023499> (accessed: 22.04.2019).

*Praktikum po agrokhimii* [Agrochemistry manual]. Moscow: MSU Publ., 2001. 689 p.

Satishur V. A., Germanovich T. M., Popleteeva R. B., Chopchits G. S., Evseenko G. A. Vliyanie izvestkovaniya na sodержanie form kaliya v derno-vo-podzolistoi legkosuglinistoi pochve [Influence of liming on a potash mode in sod-podzolic light loamy soils]. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochem.]. 2010. No. 1(44). P. 99–111.

Sokolova M. G., Akimova G. P., Khusnidinov Sh. K. Effektivnost' primeneniya biopreparatov assotsiativnykh bakterii na razlichnykh ovoshchnykh kul'turakh [Efficiency of biopreparation associative bacteria on different vegetable crops]. *Agrokhimiya* [Agrochem.]. 2009. No. 7. P. 54–59.

*Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Moscow: GEOS, 2006. 400 p.

Volodina T. I., Levchenkova A. N. Osobennosti povedeniya mineral'nogo azota v derno-vo-podzolistoi supeschanoi pochve pod vliyaniem razlichnykh sistem udobreniya [Various fertilizer system impact on the nitrogen mode features of the sandy sod-podzolic soil]. *Molochnokhoz. vestnik* [Dairy Bull.]. 2017. No. 2(26). P. 20–31.

Zav'yalova N. E., Kosolapova A. I., Storozheva A. N. Vliyanie vozrastayushchikh doz polnogo mineral'nogo udobreniya na organicheskoe veshchestvo i azotnyi rezhim derno-vo-podzolistoi pochvy Predural'ya [Effect of complete fertilizer increasing rates on organic matter and nitrogen status in soddy-podzolic soils of the Cis-Urals]. *Agrokhimiya* [Agrochem.]. 2014. No. 6. P. 20–28.

Zharikova E. A. Izmenenie kaliynogo sostoyaniya nekotorykh pochv Primor'ya pri vnesenii kaliinykh udobrenii i izvesti [Changes in potassium status of the Primorye soils at the application of mineral fertilizers and lime materials]. *Agrokhimiya* [Agrochem.]. 2008. No. 8. P. 13–19.

- Ajayi A. E., Horn R. Biochar-induced changes in soil resilience: Effects of soil texture and biochar dosage. *Pedosphere*. 2017. Vol. 27(2). P. 236–247. doi: 10.1016/S1002-0160(17)60313-8
- Bornø M. L., Müller-Stöver D. S., Liu F. Contrasting effects of biochar on phosphorus dynamics and bioavailability in different soil types. *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 627. P. 963–974. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.283
- Cao H., Ning L., Xun M., Feng F., Li P., Yue S., Song J., Zhang W., Yang H. Biochar can increase nitrogen use efficiency of *Malus hupehensis* by modulating nitrate reduction of soil and root. *Applied soil ecology*. 2019. Vol. 135. P. 25–32. doi: 10.1016/j.apsoil.2018.11.002
- Chintala R., Schumacher T. E., McDonald L. M., Clay D. E., Malo D. D., Papiernik S. K., Clay S., Julson J. L. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. *Clean: Soil, Air, Water*. 2014. Vol. 42(5). P. 626–634. doi: 10.1002/clean.201300089
- Dai Z., Zhang X., Tang C., Muhammad N., Wu J., Brookes P. C., Xu J. Potential role of biochars in decreasing soil acidification – A critical review. *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 581–582. P. 601–611. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.169
- Głąb T., Palmowska J., Zaleski T., Gondek K. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*. 2016. Vol. 281. P. 11–20. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.06.028
- Gul S., Whalen J. K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biol. Biochem.* 2016. Vol. 103. P. 1–15. doi: 10.1016/j.soilbio.2016.08.001
- Hale L., Luth M., Kenney R., Crowley D. Evaluation of pinewood biochar as a carrier of bacterial strain *Enterobacter cloacae* UW5 for soil inoculation. *Appl. Soil Ecol.* 2014. Vol. 84. P. 192–199. doi: 10.1016/j.apsoil.2014.08.001
- Jiang J., Yuan M., Xu R., Bish D. L. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws. *Soil Till. Res.* 2015. Vol. 146. P. 139–147. doi: 10.1016/j.still.2014.10.009
- Jien S.-H., Wang C.-S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*. 2013. Vol. 110. P. 225–233. doi: 10.1016/j.catena.2013.06.021
- Li S., Zhang Y., Yan W., Shangguan Z. Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil. *Soil Till. Res.* 2018. Vol. 183. P. 100–108. doi: 10.1016/j.still.2018.06.006
- Li-li H., Zhe-ke Z., Hui-min Y. Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers. *J. Integr. Agr.* 2017. Vol. 16(3). P. 704–712. doi: 10.1016/S2095-3119(16)61420-X
- Liu J., Schulz H., Brandl S., Miehtke H., Huwe B., Glaser B. Short term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2012. Vol. 175. P. 698–707. doi: 10.1002/jpln.201100172
- Liu S., Meng J., Jiang L., Yang X., Lan Y., Cheng X., Chen W. Rice husk biochar impacts soil phosphorus availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Appl. Soil Ecol.* 2017. Vol. 116. P. 12–22. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.03.020
- Liu Z., Chen X., Jing Y., Li Q. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *Catena*. 2014. Vol. 123. P. 45–51. doi: 10.1016/j.catena.2014.07.005
- Mulcahy D. N., Mulcahy D. L., Dietz D. Biochar soil amendment increases tomato seeding resistance to drought in sandy soils. *J. Arid Environ.* 2013. Vol. 88. P. 222–225. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.07.012
- Novak J. M., Cantrell K. B., Watts D. W. Compositional and thermal evaluation of lignocellulosic and poultry litter chars via high and low temperature pyrolysis. *BioEnergy Research*. 2013. Vol. 6. P. 114–130. doi: 10.1007/s12155-012-9228-9
- Raboin L.-M., Razafimahafaly A. H. D., Rabenjari-soa M. B., Rabary B., Dusserre J., Becquer T. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar. *Field Crop. Res.* 2016. Vol. 199. P. 99–108. doi: 10.1016/j.fcr.2016.09.005
- Sadaf J., Shah G. A., Shahzad K., Ali N., Shahid M., Ali S., Hussain R. A., Ahmed Z. I., Traore B., Ismail I. M. I., Rashid M. I. Improvements in wheat productivity and soil quality can accomplish by co-application of biochars and chemical fertilizers. *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 607–608. P. 715–724. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.178
- Saxena J., Rana G., Pandey M. Impact of addition of biochar along with *Bacillus* sp. on growth and yield of French beans. *Scientia Horticulturae*. 2013. Vol. 162. P. 351–356. doi: 10.1016/j.scienta.2013.08.002
- Singh R., Babu J. N., Kumar R., Srivastava P., Singh P., Raghubanshi A. S. Mul-tifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: an ecological perspective. *Ecol. Eng.* 2015. Vol. 77. P. 324–347. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.011
- Tan Z., Lin C. S. K., Ji X., Rainey T. J. Returning biochar to fields: A review. *Appl. Soil Ecol.* 2017. Vol. 116. P. 1–11. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.03.017
- Xu G., Sun J., Shao H., Chang S. X. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecol. Eng.* 2014. Vol. 62. P. 54–60. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.10.027
- Zhao R., Coles N., Kong Z., Wu J. Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions. *Soil Till. Res.* 2015. Vol. 146. P. 133–138. doi: 10.1016/j.still.2014.10.014
- Zhao X., Wang S., Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies. *J. Soil. Sediment.* 2014. Vol. 14. P. 471–482. doi: 10.1007/s11368-013-0803-2
- Zheng H., Wang Z., Deng X., Herbert S., Xing B. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma*. 2013. Vol. 206. P. 32–39. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.018

Received May 25, 2019

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Дубровина Инна Александровна**

старший научный сотрудник, к. с.-х. н.  
Институт биологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: vorgo@mail.ru

### **Юркевич Мария Геннадьевна**

заведующая лаб. экологии и географии почв, к. с.-х. н.  
Институт биологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: svirinka@mail.ru

### **Сидорова Валерия Александровна**

научный сотрудник, к. с.-х. н.  
Институт биологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: val.sidorova@gmail.com

## **CONTRIBUTORS:**

### **Dubrovina, Inna**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: vorgo@mail.ru

### **Yurkevich, Maria**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Russia  
e-mail: svirinka@mail.ru

### **Sidorova, Valeria**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Russia  
e-mail: val.sidorova@gmail.com