

## АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ

© 2022 г. Л. В. Бойцова<sup>1,\*</sup>, Е. Я. Рижия<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет  
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия

\*E-mail: larisa30.05@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

В трехлетнем вегетационно-полевом эксперименте изучили влияние внесения биоугля в дозе 20 т/га на кислотность почв, емкость катионного обмена, содержание минеральных форм азота (аммонийной и нитратной). Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре МОС–АФИ (Ленинградская обл.). Дерново-подзолистые супесчаные почвы различались по степени окультуренности: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). Схема опыта: контроль (без биоугля) и почва с биоуглем в дозе 20 т/га. Кислотность почвы и емкость катионного обмена определяли с помощью стандартного метода (ГОСТ 26423-85, ГОСТ 17.4.4.01-84). Содержание аммонийного азота в образцах почв определяли индофенольным методом, концентрацию нитратов на спектрофотометре Spectroflex 6100 (Германия). Цель исследования – оценка временных изменений кислотности почв, их емкости катионного обмена и содержания минеральных форм азота при внесении в них биоугля. По окончании 3-летнего эксперимента зафиксировано незначительное увеличение кислотности почв в вариантах СОК на 0.05 ед. рН, в вариантах ВОК – на 0.1 ед. рН, что, вероятно, связано с уменьшением известкового эффекта биоугля. Показатели емкости катионного обмена по окончании эксперимента увеличились в почве СОК в среднем на 15, в почве ВОК – на 7%. Внесение биоугля в почвы повысило емкость катионного обмена почвы СОК на 15, почвы ВОК – на 8% по сравнению с показателями 2019 г. Во всех вариантах произошло увеличение концентрации аммиачной формы азота в 2.3–2.5 раза, что связано с метеорологическими условиями периода исследования. Содержание нитратной формы азота изменилось незначительно, произошло увеличение ее содержания в почве СОК в 1.1–1.3 раза, в почве ВОК, наоборот, отмечено уменьшение содержания нитратов в 1.0–1.2 раза. При этом наибольшие изменения были характерны для вариантов с биоуглем.

*Ключевые слова:* потенциальная кислотность, емкость катионного обмена, аммонийный азот, нитратный азот, древесный биоуголь, дерново-подзолистая почва, степень окультуренности.

**DOI:** 10.31857/S0002188122070043

### ВВЕДЕНИЕ

Биоуголь используют в сельском хозяйстве в качестве мелиоранта, который обладает рядом положительных свойств. В частности, уменьшает потери азота из почвы в результате эмиссии и потери неорганического азота со стоком. Например, в полевых исследованиях применение древесного биоугля (400°C при 2-х и 4% от массы почвы) вместе с компостом из зеленых отходов сократило потери неорганического азота со стоком на 41.8, объем стока – на 16.8 и потерю почвы – на 25% [1]. Уменьшение непродуктивных потерь

азота способствовало повышению эффективности использования удобрений, увеличению урожайности [2]. Биоуголь широко используют для улучшения физико-химических свойств почв, создания и поддержания органического пула почвы [2], улучшения биологических свойств почвы [3].

Внесение биоугля в почву также влияет на цикл азота в почве [4, 5]. Применение биоугля увеличивает скорость нитрификации, а природные пулы органического азота играют значительную роль в дополнительной чистой минерализации азота [5]. Тем не менее, трехлетнее исследо-

вание возделывания кукурузы с добавлением бамбукового биоугля ( $600^{\circ}\text{C}$ ) в дозе 7 т/га с минеральными удобрениями и биогумусом не показало значительного влияния на концентрации растворенных  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_3^-$  в стоке в первые 2 года по сравнению с обработками, в которых применяли только минеральные удобрения или биогумус [6].

Биоуголь, полученный из древесного сырья, имеет большую площадь поверхности по сравнению с биоуглем, полученным из травянистого сырья [7]. В работе [8] исследовали влияние типов сырья и температур пиролиза на различные свойства биоугля, полученного из 12-ти видов сырья, включая навоз животных, древесные отходы, растительные остатки при температуре от 200 до  $650^{\circ}\text{C}$ . Обнаружили, что общий углерод, емкость катионного обмена, способность связывания углерода, в большей степени зависели от типа сырья. Тем не менее, такие показатели, как содержание ароматического С, летучих веществ, зольность, рН, устойчивость к внешнему воздействию, были более чувствительными к температуре пиролиза. В то же время, площадь поверхности, объем пор и средний размер пор зависели как от температуры производства, так и от типа сырья. Влияние различных доз биоугля, его качественного состава на основные агрохимические свойства почв, такие как кислотность, емкость катионного обмена, содержание минеральных форм азота, рассмотрено рядом исследователей. В работах [9, 10] показано увеличение рН песчаной и супесчаной почв, в опыте [11] – увеличение емкости катионного обмена данных почв. Внесение древесного угля с добавлением шелухи зерна ячменя (1 : 1) в дозе 6 т/га в темно-серую тяжелосуглинистую почву (Harlic Luvisol) привело к увеличению содержания аммонийной и нитратной форм азота [12]. Воздействие биоугля на почву, в которую он внесен в качестве мелиоранта, остается до конца не изученным вопросом.

Цель работы – оценка временных изменений кислотности почв, их емкости катионного обмена и содержания минеральных форм азота при внесении в них биоугля.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проведены с середины мая по конец сентября 2019–2021 гг. на территории экспериментальной опытной станции АФИ (МОС-АФИ) (п. Меньково, Гатчинский р-н, Ленинградская обл.).

Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре МОС-АФИ.

Почвы стационара представлены дерново-подзолистыми супесчаными разновидностями [13], различающимися по степени окультуренности и качеству – среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). В 2003–2005 гг. в среднеокультуренную почву был внесен навоз крупного рогатого скота 220 т/га, в высокоокультуренную почву – 540 т/га.

На начало вегетационных периодов 2019–2021 гг. почва участков СОК и ВОК характеризовалась агрохимическими показателями, представленными в табл. 1. Динамика изученных параметров почвы за 2019–2020 гг. представлена авторами ранее в работах [14–16].

Опытные делянки размером  $4\text{ м}^2$  ( $2 \times 2\text{ м}$ ) заложены 20 мая 2019 г. на парцеллах почв с СОК и ВОК, на контрольных участках – без дополнительного внесения различных доз минеральных удобрений. Схема опыта включала 2 варианта в трехкратной повторности: 1 – контроль (без биоугля), 2 – почва с биоуглем в дозе 20 т/га.

В качестве биоугля использовали древесный уголь из березы сорта “Премиум” (береза 1-го класса), фракция с размером частиц угля 0–5 см. Произведен быстрым пиролизом при температуре  $600^{\circ}\text{C}$  на предприятии ООО “Файервуд” (Ленинградская обл., Тосненский р-н, д. Коркино). Химическая характеристика биоугля представлена в табл. 2.

Перед внесением в почву биоуголь просеивали через сито с размером ячейки 2 см. Биоуголь в дозе 20 т/га (или  $2\text{ кг/м}^2$ ) вносили в верхний 10-см слой почвы вручную.

На делянках в течение вегетационного периода 2019 г. в качестве тест-объекта возделывали викоовсяную смесь (вика посевная яровая сорта Львовский (*Vicia sativa* L.) и овес яровой сорта Боррус (*Avena sativa* L.) в соотношении 30 : 70 соответственно) из расчета 200 кг/га (или 85 г семян/4  $\text{м}^2$ ). Посев состоялся 21 мая. В 2020 г. возделывали люпин белый сорта Дега (*Lupinus albus* L.) как сидерат под озимую пшеницу, дата посева – 15 мая, посевная норма – 200 кг/га, дата заделки – 16 августа. В 2021 г. возделывали озимую пшеницу сорта Немчиновская 85. Норма высева составила 320 семян/м<sup>2</sup>. Дата посева – 03 сентября 2020 г., дата уборки – 05 августа 2021 г. Далее проводили лущение на глубину, культивацию на 10 см, в сентябре был высажен озимый рапс на сидерат.

Отбор почвенных образцов из вариантов опыта проводили по стандартной методике [17] из слоя 0–10 см. Объединенную пробу каждого варианта составляли из индивидуальных проб, отобранных равномерно со всей площади участка.

**Таблица 1.** Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой супесчаной почвы, использованной в опыте (исходные данные на начало вегетационных периодов 2019–2021 гг.)

Почва	Год	Вариант	рН <sub>KCl</sub>	C <sub>общ</sub>	N <sub>общ</sub>	Минеральный азот		Подвижные	
				%		N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
				мг/кг					
СОК	2019	К	5.3 ± 0.21a	1.53 ± 0.02a	0.17 ± 0.01a	16.4 ± 1.5c	5.6 ± 0.3a	255 ± 25a	112 ± 11a
	2020	К	5.2 ± 0.14a	1.54 ± 0.08a	0.17 ± 0.02a	8.2 ± 0.6a	7.3 ± 0.4b	284 ± 14b	134 ± 13b
		Б	5.5 ± 0.05a	1.57 ± 0.13b	0.18 ± 0.04a	12.4 ± 0.9b	10.4 ± 0.2c	298 ± 21b	137 ± 21b
	2021	К	5.2 ± 0.29a	1.52 ± 0.24a	0.17 ± 0.22a	10.3 ± 0.9a	9.3 ± 0.7b	267 ± 24a	139 ± 33b
Б		5.6 ± 0.13b	1.58 ± 0.09b	0.18 ± 0.27a	14.1 ± 1.7b	12.4 ± 0.5c	302 ± 29b	141 ± 28b	
ВОК	2019	К	6.4 ± 0.17c	2.92 ± 0.04c	0.28 ± 0.0b	22.3 ± 2.4d	6.7 ± 0.3b	994 ± 37c	542 ± 26c
	2020	К	6.4 ± 0.08c	2.98 ± 0.03c	0.29 ± 0.04b	12.1 ± 1.8b	14.1 ± 0.6d	1025 ± 45c	554 ± 34c
		Б	6.7 ± 0.09d	3.16 ± 0.09d	0.31 ± 0.08b	18.7 ± 0.7c	13.9 ± 0.6d	1165 ± 68d	586 ± 18d
	2021	К	6.4 ± 0.13c	2.95 ± 0.23c	0.29 ± 0.06b	13.5 ± 1.2b	12.3 ± 0.6c	1015 ± 37c	551 ± 28c
Б		6.8 ± 0.17d	3.21 ± 0.24d	0.32 ± 0.05b	21.7 ± 0.6d	14.8 ± 0.6d	1145 ± 63d	594 ± 21d	

Примечание. СОК – почва со средней степенью окультуренности, ВОК – почва с высокой степенью окультуренности, К – контроль (без биоугля), Б – почва с биоуглем, рН<sub>KCl</sub> – кислотность почвы; C<sub>общ</sub> – содержание общего органического углерода, N<sub>общ</sub> – содержание общего азота, N-NO<sub>3</sub> – содержание нитратного азота, N-NH<sub>4</sub> – содержание аммонийного азота, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – содержание подвижного фосфора, K<sub>2</sub>O – содержание подвижного калия. Величины с разными буквами (a, b, c, d) существенно различаются при  $p < 0.05$  (ANOVA, критерий Тьюки). То же на рис. 1–5.

**Таблица 2.** Химический состав биоугля (исходные данные до начала полевого опыта)

C <sub>общ</sub>	N <sub>общ</sub>	C : N	H, %	H : C	O, %	O : C	рН <sub>H2O</sub>	W <sub>гв</sub> , %	Зольность, %
%									
88.9	0.43	207	3.2	0.04	5.1	0.06	8.3	3.1	1.8

Примечание. H – содержание водорода, O – содержание кислорода, W<sub>гв</sub> – гигроскопическая влажность биоугля.

Периодичность отбора образцов в 2019–2020 гг. – каждые 10–12 сут, в 2021 г. – 1 раз в месяц.

Метеорологические данные в течение вегетационных периодов 2019–2021 гг. фиксировали на метеостанции, находящейся в 200 м от Агрофизического стационара.

Сравнивая вегетационные периоды изученных годов (2019–2021 гг.) можно отметить следующие особенности гидрометеорологических показателей. Май исследованных годов характеризовался как холодный месяц с высоким количеством выпадающих осадков – до 80 мм в 2019 и 2020 гг. и до 245 мм в 2021 г. Июнь был всегда засушливым и жарким. Июль в течение первых 2-х лет был теплым и влажным, в 2021 г. – жарким и сухим. В августе начиналось снижение среднесуточной температуры воздуха и увеличение количества выпадающих осадков до 180 мм за месяц. Сентябрь – холодный и умеренно-влажный.

Средняя температура воздуха за вегетационные периоды (май–сентябрь) 2019–2021 гг. составила 14.2, 14.5 и 15.7°C соответственно, что харак-

теризует их как умеренно-холодные периоды, а количество выпавших осадков – 451, 517 и 536 мм – как умеренно влажные периоды.

Кислотность почвы и емкость катионного обмена определяли с помощью стандартного метода (ГОСТ 26423-85, ГОСТ 17.4.4.01-84). Содержание аммонийного азота в образцах почв определяли колориметрическим методом в солевой вытяжке (1 н. раствор KCl), индофенольным методом (ГОСТ 26489-85), а концентрацию нитратов – в виде окрашенного диазосоединения (ГОСТ 26488-85) на спектрофотометре Spectroflex 6100 (WTW, Германия).

Все анализы выполнены в трехкратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ “Microsoft Excel”. Определены средние величины, стандартные отклонения, корреляции Пирсона, достоверность различий средних определяли при  $p \leq 0.05$ .

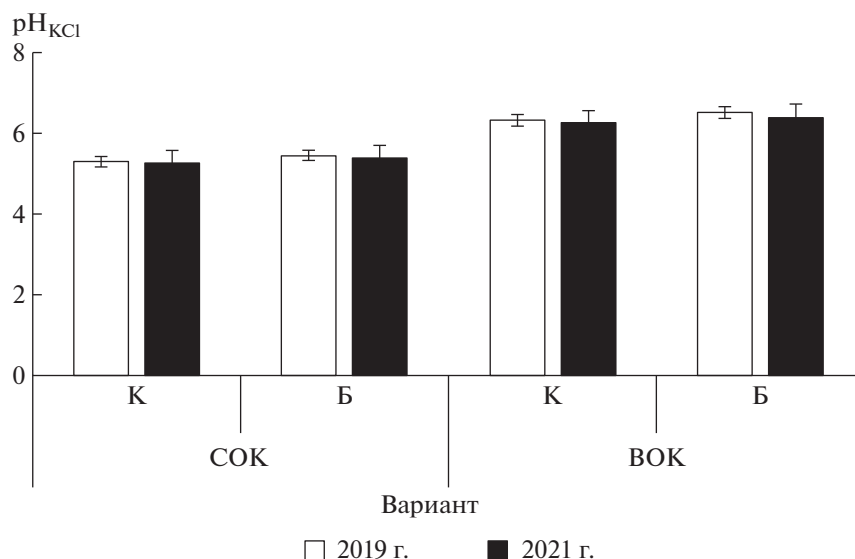


Рис. 1. Изменение  $pH_{KCl}$  дерново-подзолистой супесчаной почвы разной окультуренности при внесении биоугля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

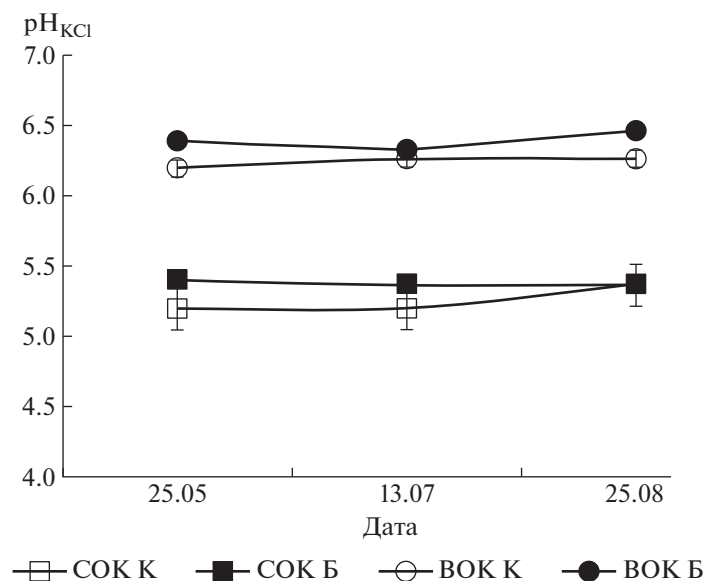
По-прежнему остается не достаточно изученным вопрос, как меняется кислотность почвы при внесении в нее биоугля, и как долго сохраняется мелиорирующий эффект. На рис. 1 представлен средний показатель  $pH_{KCl}$  дерново-подзолистой супесчаной почвы разного качества за вегетационные периоды 2019 и 2021 гг. Показано, что изначально между вариантами почвы с различной степенью окультуренности (СОК и ВОК) отмечены достоверные различия по показателю актуальной кислотности ( $p < 0.05$ ), в среднем на 1 ед.

В 2021 г. средний показатель pH в почвах с биоуглем незначительно уменьшился по сравнению с началом эксперимента и составил 5.4 и 6.4 ед. pH соответственно для почв с СОК и ВОК, превышая величину pH почвы без биоугля. Таким образом, древесный биоуголь, внесенный в почвы из расчета 20 т/га, не оказал существенного влияния на изменение данного показателя, как в почве с СОК, так и ВОК.

Если в 2020 г., спустя 2 года после внесения мелиоранта, прослежен тренд снижения кислотности почвы на 0.2 и 0.4 ед. соответственно для вариантов с различной степенью окультуренности, что также подтверждено нашим лабораторным экспериментом [15], то спустя 3 года, наоборот, отмечено незначительное увеличение кислотности почв. Ученые обращают внимание, что мелиорирующий эффект “известкования биоуглем” зависит от его количества, внесенного в почву, и от исходного состава биомассы, из которого приготовлен биоуголь, а также от условий

пиролиза [18]. Например, температура пиролиза  $>400^{\circ}C$  дает биоуголь со щелочными свойствами [19]. Сырье и температура пиролиза определяют конечную концентрацию карбонатов, что делает некоторые биочары лучшими известковыми мелиорантами. Концентрация в них карбонатов может варьировать от 0.5 до 33% в зависимости от исходных условий получения [20]. В работе [18] показано максимальное увеличение показателя pH почвы при внесении древесного биоугля из эвкалипта в дозе 12 т/га по сравнению с дозой 8 т/га с совместным внесением извести в дозе 2 т/га. Биоуголь в данном эксперименте имел  $pH = 8.43$ . Известковый эффект биоугля подтвержден для кислых Ultisoils [21]. Щелочность биоуглей является главным фактором, влияющим на их способность к известкованию, когда в почву вносили биоуголь с высоким pH, почва становилась менее кислой [22]. При этом улучшающее действие биоугля на pH почвы увеличивалось с увеличением дозы последнего. В опыте на кислой супесчаной почве [23] внесение угля из эвкалиптового дерева в дозах 5, 10 и 20 т/га через 15 сут инкубации привело к значительному повышению pH почвы. Использование биоугля из рисовой шелухи не повышало pH почвы за данный период.

На рис. 2 представлена динамика  $pH_{KCl}$  дерново-подзолистой супесчаной почвы разной окультуренности. Как видно из представленных результатов, между вариантами почвы с различной степенью окультуренности отмечены различия показателя актуальной кислотности в течение вегетационного периода. В почве с СОК



**Рис. 2.** Динамика показателя  $pH_{KCl}$  дерново-подзолистой супесчаной почвы разной окультуренности при внесении биоугля.

$pH_{KCl}$  варьировал от 5.2 ед. в начале вегетационного периода до 5.4 ед. в конце вегетационного периода, а в почве ВОК – соответственно от 6.2 до 6.3 ед.

Внесение в почву биоугля с исходно высоким  $pH$ , составлявшим 8.3 ед., позволило повысить  $pH$  почвы с СОК с 5.2 до 5.4 ед., а в почве с ВОК – от 6.2 до 6.5 ед.

Результаты 3-летнего полевого эксперимента подтвердили мелиорирующую способность биоугля в снижении кислотности почвы. Если биоуголь имеет щелочную природу, его применение в почве приводит к увеличению показателя  $pH$  почвы в разной степени в зависимости от исходного сырья и типа почвы [24]. Однако спустя 3 года отмечали ослабление мелиорирующего эффекта внесения биоугля.

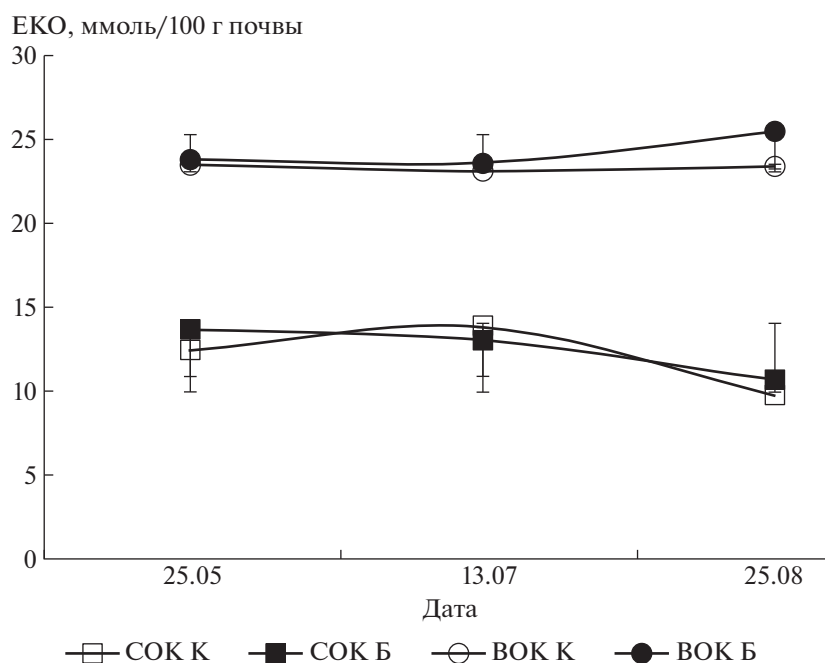
Значимым направлением исследований состояния и устойчивости биоугля в почвах является комплексный анализ его роли в управлении такими функциями почв, как буферная способность, накопление и вынос питательных элементов, участие биоугля в биохимическом круговороте. Это направление исследований тесно связано с изучением емкости катионного обмена, поскольку микро-, мезо- и макропоры и удельная поверхность биоугля также влияют на данные функции почв. Высокая ЕКО означает, что почва может содержать значительное количество катионов, необходимых для роста и развития растений. При низком показателе питательные вещества не свя-

заны частицами гумуса и глины, поэтому легко вымываются в подпахотный слой.

Полевые исследования 2021 г. зафиксировали незначительные изменения ЕКО к окончанию вегетационного периода (рис. 3) во всех вариантах опыта. В почве СОК емкость катионного обмена незначительно уменьшилась к окончанию вегетационного периода в контроле с 12.5 до 9.82 ммоль экв/100 г, в почве с внесением биоугля наблюдали уменьшение данного параметра с 13.7 до 10.7 ммоль экв/100 г.

В почве с ВОК емкость катионного обмена незначительно уменьшилась к окончанию вегетационного периода в контроле с 23.6 до 23.3 ммоль экв/100 г, в почве с внесением биоугля, напротив, зафиксировано увеличение данного параметра с 23.9 до 25.6 ммоль экв/100 г. Внесение биоугля не вызвало значимого изменения емкости катионного обмена почв во всех вариантах опыта. Возможно, непродолжительное влияние биоугля и изменяющихся погодных условий на емкость катионного обмена оказалось недостаточным для ее изменений.

Как видно из представленных данных, величина емкости катионного обмена почвы СОК была достоверно меньше ( $p < 0.001$ ) в среднем на 52%, чем данный показатель в почве ВОК, что связано с различным содержанием органического вещества, карбоксильных групп и физической глины в сравниваемых почвах. Предполагали, что внесение биоугля в почвы должно изменить величину емкости катионного обмена, судя по наличию большого количества карбоксильных групп –



**Рис. 3.** Изменение емкости катионного обмена дерново-подзолистой супесчаной почвы разной окультуренности в течение вегетационного периода при внесении биоугля.

СООН в данном мелиоранте, обладающих строгим сродством к ассоциации с катионами при нейтральной реакции, которая наиболее типична для верхних горизонтов дерново-подзолистых почв с высоким содержанием гумуса.

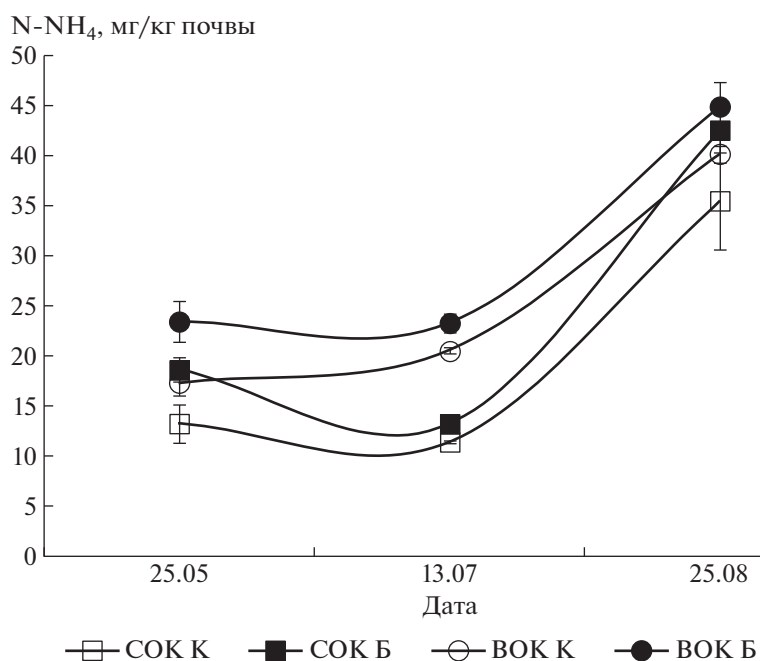
Следует отметить, что показатели ЕКО в исследованных почвах по сравнению с 2019 г. несколько увеличились: почвы СОК — в среднем на 15, почвы ВОК — на 7%. Внесение биоугля в почвы повысило показатели емкости катионного обмена в почве СОК на 15, почвы ВОК — на 8% по сравнению с показателями 2019 г. Увеличение ЕКО в опыте при внесении древесного биоугля согласовалось с данными других авторов [18].

В течение периода измерений от мая до начала июля содержание аммонийной формы азота в почве варианта СОК контроль оставалось практически на одном уровне (6.60–6.84 мг/кг почвы), затем в середине июля происходило увеличение содержания аммонийного азота в 2.2 раза по сравнению с началом наблюдений (рис. 4). К окончанию периода зафиксировано уменьшение концентрации  $N-NH_4$  до 8.13 мг/кг почвы, что превосходило показатель мая. Внесение биоугля привело к повышению содержания аммонийного азота в почве с СОК. Тренд изменения содержания  $N-NH_4$  в почве СОК с биоуглем был таким же, как и в почве СОК контроль, за исключением начала периода измерений в мае, где зафиксирова-

но небольшое уменьшение содержания аммонийной формы азота.

Содержание аммонийного азота в дерново-подзолистой супесчаной почве СОК и ВОК несколько снижалось к середине вегетационного периода, затем увеличивалось. В вариантах почвы ВОК отмечено увеличение концентрации аммонийного азота к окончанию периода наблюдений. В почве СОК снижение концентрации  $N-NH_4$ , вероятно, связано с интенсивным ростом растений в данный период, поскольку для образования белков растения поглощают азот преимущественно в аммонийной форме. В почве ВОК такого снижения не наблюдали, вероятно, из-за компенсации потребности растущих растений в ионе аммония за счет его содержания в органическом веществе почвы ВОК, т.к. гумусированность данной почвы превышала таковую почвы СОК в 1.9 раза.

Внесение биоугля привело к повышению содержания аммонийного азота в почвах СОК и ВОК. В вариантах с почвой СОК биоуголь способствовал увеличению содержания  $N-NH_4$  в среднем на 23.7, в вариантах с почвой ВОК — на 17.6%. Повышение содержания аммонийного азота в почве с биоуглем могло быть связано с адсорбцией  $N-NH_4$  на поверхности биоугля, и, как результат, со снижением выщелачивания  $N-NH_4$  из почвы, а также с усилением процесса аммони-



**Рис. 4.** Динамика содержания аммонийного (N-NH<sub>4</sub>) азота в дерново-подзолистой супесчаной почве средней и высокой степени окультуренности при внесении биоугля (полевой опыт).

фикации. Исследование [25] с использованием метки <sup>15</sup>N показало, что инкубация биоугля кукурузы с почвой в количестве 1% увеличивала процесс аммонификации.

Содержание нитратного азота в почве с ВОК было достоверно больше ( $p < 0.05$ ), чем в почве с СОК (рис. 5). В дерново-подзолистой супесчаной почве с СОК наблюдали снижение содержания нитратного азота в течение вегетационного периода. В почве ВОК концентрация N-NH<sub>3</sub> значительно уменьшалась к середине периода наблюдений, затем отмечали ее увеличение к окончанию вегетационного периода.

Внесение биоугля в почвы СОК и ВОК привело к накоплению в почве недостоверно большего количества нитратов по сравнению с контрольными вариантами, что, по-видимому, свидетельствовало о более интенсивном процессе нитрификации в почвах с биоуглем, что согласовалось с данными других авторов [5]. Внесение биоугля в почву с СОК повысило содержание N-NO<sub>3</sub> в среднем на 52, в почву с ВОК – на 14%.

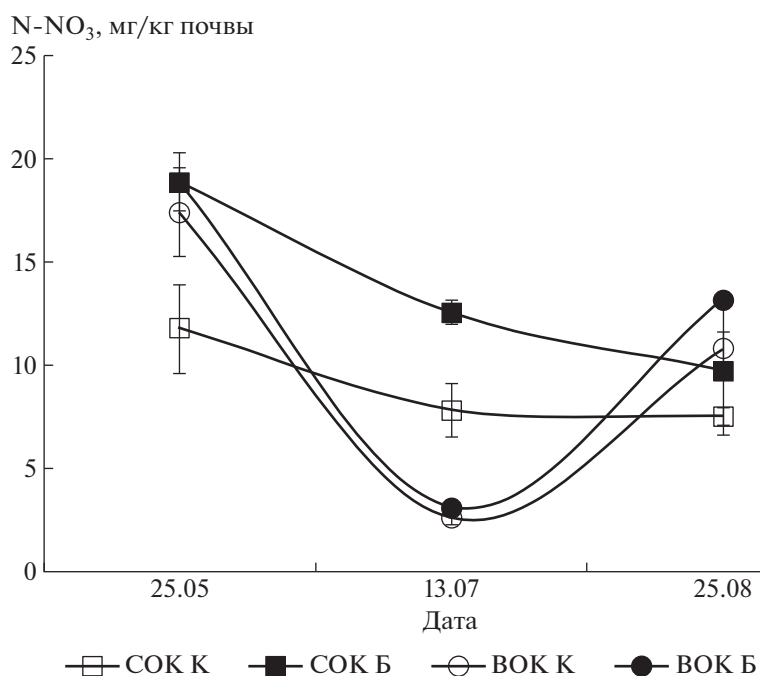
В инкубационном исследовании [26] использовали 3 источника удобрений на 5-ти типах почв с биоуглем из птичьего помета и биоуглем из скорлупы орехов макадамии для изучения скорости аммонификации и нитрификации. В целом наблюдали снижение концентрации NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (аммонификация) и соответствующее увеличение кон-

центрации NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (нитрификация) в первые сутки инкубации во всех обработанных почвах. Другое исследование показало увеличение общей минерализации азота на 185–221%, увеличение нитрификации на 10–69% и увеличение содержания NH<sub>4</sub><sup>+</sup> на 508% при внесении в почву кукурузного биоугля [25]. Вопреки сообщениям о том, что добавление биоугля может способствовать минерализации запасов органического азота в почве [5, 25], в работе [27] обнаружили, что при внесении биоугля из древесины бука (24 и 72 т/га) в почвы от песчаного до суглинистого типа биоуголь способствовал увеличению запасов органического азота в почве и замедлял высвобождение азота из органических источников. Более того, обнаружили, что применение биоугля вместе с неорганическими удобрениями усиливало этот процесс.

Сравнивая величины концентраций аммонийного и нитратного азота изученных почв в 2019 и в 2021 гг., можно отметить следующие тенденции. Во всех вариантах произошло увеличение концентрации аммиачной формы азота, что связано с метеорологическими условиями периода исследования. Содержание нитратной формы азота увеличилось в почве СОК, в почве ВОК, наоборот, отмечали уменьшение содержания нитратов.

В контрольных вариантах изученных почв зафиксировано следующее увеличение содержания аммонийной формы азота: в почве СОК – на 153,





**Рис. 5.** Динамика содержания нитратного (N-NO<sub>3</sub>) азота в дерново-подзолистой супесчаной почве со средней (СОК) и высокой (ВОК) степенью окультуренности при внесении биоугля (полевой опыт).

в почве ВОК — на 137%. Внесение биоугля привело к увеличению концентрации ионов аммония: в почве СОК — на 150, в почве ВОК — на 129%.

В контрольных вариантах отмечены следующие изменения содержания нитратов: в почве СОК наблюдали увеличение их содержания на 14, в почве ВОК — снижение на 6%. Внесение биоугля привело к увеличению концентрации нитратной формы азота: в почве СОК — на 34, в почве ВОК, напротив, — ее снижению на 20%. В целом для вариантов с биоуглем были характерны более высокие уровни содержания N-NH<sub>4</sub> и N-NO<sub>3</sub>, что согласовалось с нашими данными [14], а также данными других авторов [12, 25].

Корреляционный анализ выявил высокую отрицательную связь между содержанием нитратного азота в почве в 2021 г. и температурой почвы во всех вариантах ( $r = -0.75 \dots -1$ ) и положительную связь с влажностью почв, высокую для почвы ВОК ( $r = 0.97-0.99$ ) и среднюю для почвы СОК ( $r = 0.48-0.65$ ). Содержание аммонийного азота имело с величинами температуры в основном слабую отрицательную связь ( $r = -0.07 \dots -0.20$ ) и среднюю положительную связь с влажностью почвы для почвы СОК ( $r = 0.33-0.40$ ), таковая связь была слабой для почвы ВОК ( $r = 0.16-0.29$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в конце 3-летнего эксперимента зафиксировано незначительное увеличение кислотности почв: в вариантах СОК — на 0.05 ед. рН, в вариантах ВОК — на 0.1 ед. рН, что, вероятно, было связано с уменьшением известкового эффекта биоугля. Показатели ЕКО в исследованных почвах по сравнению с 2019 г. несколько увеличились, а именно на 1.5–2.6 ммоль/100 г почвы.

Во всех вариантах опыта произошло увеличение концентрации аммиачной формы азота в 2.3–2.5 раза, что было связано с метеорологическими условиями периода исследования. Содержание нитратной формы азота изменялось незначительно, произошло увеличение ее содержания в почве СОК на 1.0–3.5 мг/кг почвы (в 1.1–1.3 раза), в почве ВОК, наоборот, отмечено уменьшение содержания нитратов на 0.7–3.0 мг/кг почвы (в 1.1–1.2 раза). При этом наибольшие изменения были характерны для вариантов с биоуглем.

Двухфакторный дисперсионный анализ выявил в полевом эксперименте 2021 г. преимущественное положительное влияние на величины рН и ЕКО степени окультуренности почвы,  $F_{\text{факт}} > F_{\text{крит}}$  (4489 > 161.45 для рН; 1855.38 > 161.45 для ЕКО при  $p < 0.01$ ). В полевом эксперименте 2021 г. зафиксировано положительное влияние на изменение содержания аммонийного азота в почвах 2-х факторов: дозы органических удобрений и



внесения биоугля. Однако степень окультуренности оказала большее влияние на изменение содержания аммонийного азота, чем внесение биоугля ( $4273.29 > 161.45$  при  $p < 0.009$ ; и  $2688.22 > 161.45$  при  $p < 0.01$  соответственно). Влияние степени окультуренности почвы и внесения биоугля на содержание в почвах нитратного азота в 2021 г. не выявлено.

В течение 3-х лет преимущественное влияние на показатель рН почвы и содержание в ней аммонийного азота оказывала степень окультуренности почв, а не внесение биоугля. Влияние на величину ЕКО и содержание в почвах нитратов в данный период носило различный характер (влияла степень окультуренности или не было выявлено влияния ни степени окультуренности, ни дозы биоугля).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li J., Shen F., Yang G., Zhang Y., Deng S., Zhan J., Zeng Y., Luo T., Mei Z.* Valorizing rice straw and its anaerobically digested residues for biochar to remove Pb(II) from aqueous solution // *Inter. J. Polymer Sci.* 2018. V. 11. P. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/2684962>
2. *Bedassa M.* Soil acid management using Biochar: Review // *Inter. J. Agric. Sci/ Food Technol.* 2020. V. 6 (2). P. 211–217. DOI: 00076 <https://doi.org/10.17352/2455-815X.0>
3. *Giagnoni L., Maienza A., Baronti S., Vaccari F. P., Genesio L., Taiti C., Martellini T., Scodellini R., Cincinelli A., Costa C., Mancuso S., Renella G.* Long-term soil biological fertility, volatile organic compounds and chemical properties in a vineyard soil after biochar amendment // *Geoderma.* 2019. V. 344. P. 127–136.
4. *Zimmerman A.R., Gao B., Ahn M.-Y.* Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils // *Soil Biol. Biochem.* 2011. V. 43. P. 1169–1179.
5. *Li M., Liu M., Li Z.-p., Jiang C.-y., Wu M.* Soil N transformation and microbial community structure as affected by adding biochar to a paddy soil of subtropical China // *J. Integrat. Agricult.* 2016. V. 15. P. 209–219.
6. *Doan T. T., Henry-des-Tureaux T., Rumpel C., Janeau J.-L., Jouquet P.* Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: a three year mesocosm experiment // *Sci. Total Environ.* 2015. V. 514. P. 147–154.
7. *Useviciute L., Baltreinaite-Gedienė e.* dependence of pyrolysis temperature and lignocellulosic physical-chemical properties of biochar on its wettability // *Biomass Convers. Biorefin.* 2021. V. 11. P. 2775–2793.
8. *Zhao L., Cao X., Masek O., Zimmerman A.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures // *J. Hazard. Mater.* 2013. V. 256–257. P. 1–9.
9. *Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Медиаторативные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // *Агрохимия.* 2016. № 9. С. 46–53.
10. *Дурова А.С., Жигунов А.В.* Влияние биоугля на показатели плодородия почв и рост сеянцев ели в посевах отделений лесных питомников // *Изв. СПб. лесотехн. акад.* 2018. Вып. 223. С. 140–153. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.223.140-153>
11. *Дубровина И.А.* Динамика физико-химических свойств дерново-подзолистых почв при внесении биоугля // *Пробл. агрохим. и экол.* 2019. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.26178/АЕ.2019.51.56.004>
12. *Мухина И.М., Хорак Я., Рижия Е.Я.* Динамика минерального азота в темно-серой лесной почве при совместном внесении биоугля с компостом и сульфатом аммония // *Пробл. агрохим. и экол.* 2019. № 2. С. 14–18.
13. *Моисеев К.Г., Гончаров В.Д., Зинчук Е.Г., Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Гурин П.Д., Старцев А.С., Пищик В.Н.* База данных почвенного покрова Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии (структура почвенного покрова, геоморфологическое строение, физические и геохимические свойства почв) Свид-во о регистр. базы данных RU2013620682. Заявка № 2013620301 от 22.03.2013.
14. *Бойцова Л.В., Рижия Е.Я.* Влияние биоугля на сезонную динамику минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве разного качества // *Мат-лы Международный. научн. семинара “Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду”.* АФИ, Санкт-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2020. С. 16–20.
15. *Бойцова Л.В., Рижия Е.Я., Дубовицкая В.И.* Динамика кислотности и емкости катионного обмена дерново-подзолистой супесчаной почвы при внесении биоугля // *Агрохимия.* 2021. № 9. С. 22–29.
16. *Бойцова Л.В., Рижия Е.Я., Москвин М.А.* Содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности при внесении в нее биоугля // *Агрохимия.* 2021. № 11. С. 25–32.
17. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
18. *Kedir Jemal, Abrham Yakob.* Role of Bio Char on the amelioration of soil acidity // *Agrotechnology.* 2021. V. 10. Iss. 4. № 212. P. 1–7.
19. *Janeau J.L., Gillard L.C., Grellier S., Jouquet P., Le T.P.Q., Luu T.N.M.* Soil erosion, dissolved organic carbon and nutrient losses under different land use systems in a small catchment in northern Vietnam // *Agric. Water Manag.* 2014. V. 146. P. 314–323.
20. *Fidel R.B., Laird D.A., Thompson M.L., Lawrinenko M.* Characterization and quantification of biochar alkalinity // *Chemosphere.* 2017. V. 167. P. 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.151>
21. *Kwapinski W., Byrne C.M.P., Kryachko E., Wolfram P., Adley C., Leahy J.J.* Biochar from biomass and waste // *Waste Biomass Valorization.* 2010. V. 1. P. 177–189.
22. *Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C.* Biochar effects on soil biota: A review // *Soil Biol. Soilchem.* 2011. V. 43. P. 1812–1836.

23. *Rajpal Shetty, Nagabovanalli Basavarajappa Prakash.* Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. P. 12249. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69262-x>
24. *Case S.D.C., McNamara N.P., Reay D.S., Whitaker J.* The effect of biochar addition on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from a sandy loam soil and the role of soil aeration // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 51. P. 125–134.
25. *Nelissen V., Rütting T., Huygens D., Staelens J., Ruyschaert G., Boeckx P.* Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 55. P. 20–27.
26. *Mandal S., Thangarajan R., Bolan N.S., Sarkar B., Khan N., Ok Y.S., Naidu R.* Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat // *Chemosphere.* 2016. V. 142. P. 120–127.
27. *Prommer J., Wanek W., Hofhansl F., Trojan D., Offre P., Urich T., Schleper C., Sassmann S., Kitzler B., Soja G., Hood-Nowotny R.C.* Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial // *PLoS One.* 2014. V. 9. P. 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086388>

## Agrochemical Properties of Loamy Sand Podzolic Soil with Different Fertility after Three Years of Biochar Application

L. V. Boitsova<sup>a,#</sup> and E. Y. Rizhiya<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Agrophysical Research Institute  
Grazhdansky prosp. 14, St.-Petersburg 195220, Russia*

<sup>b</sup>*Russian State Hydrometeorological University  
Voronezhskaya ul. 79, St.-Petersburg 192007, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: larisa30.05@mail.ru*

In a three-year vegetation-field experiment the effect of applying biochar at a dose of 20 t/ha on soil acidity, cation exchange capacity, and the content of mineral forms of nitrogen (ammonium and nitrate) at a loamy sand soddy-podzolic soil with low and high fertility were studied. The experiment was done at the Agrophysical Experimental Station (Leningrad region). It included the subsequent treatment in 3 replication: control (without biochar) and soil with biochar at a dose of 20 t/ha. Soil acidity and cation exchange capacity were determined using the standard method. Ammonium nitrogen content in soil samples was determined by the indophenol method, the concentration of nitrates on a Spectroflex 6100 spectrophotometer (Germany). The purpose of the study is to assess the temporal changes in soil acidity, their cation exchange capacity, and the content of mineral forms of nitrogen when biochar is applied to them. At the end of the three-year experiment, a slight increase by 0.05 pH in soil acidity was recorded, in the soils with low fertility (LF) units, and by 0.1 pH units in the soil with high fertility (HF), which is probably due to a decrease in the calcareous effect of biochar. At the end of the experiment, the cation exchange capacity values increased by an average of 15% for the LF soil and by 7% for the HF soil. The introduction of biochar into soils increased the cation exchange capacity values in the LF soil by 15% in the HF soil by 8%, compared with the indicators of 2019. In all variants, there was an increase in the concentration of the ammonia form of nitrogen by 2.3–2.5 times, which is associated with the meteorological conditions of the study period. The content of the nitrate form of nitrogen changed slightly, there was an increase in their content in the soil with LF by 1.1–1.3 times, in the soil with HF, and on the contrary, a decrease in the content of nitrates by 1.1–1.2 times was noted. At the same time, the most significant changes are typical for variants with biochar.

*Key words:* potential acidity, cation exchange capacity, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, wood biochar, loamy sand soddy-podzolic soil, soil fertility.