

УДК 631.415:631.445.24:631.878

ДИНАМИКА КИСЛОТНОСТИ И ЕМКОСТИ КАТИОННОГО ОБМЕНА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ

© 2021 г. Л. В. Бойцова^{1,*}, Е. Я. Рижия^{1, 2}, В. И. Дубовицкая¹¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия² Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79, Россия

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

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.

После доработки 21.04.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

В двухлетнем вегетационно-полевом эксперименте и 7-месячном лабораторном опыте изучили влияние внесения биоугля в дозе 20 т/га на величины кислотности и емкости катионного обмена. Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре МОС-АФИ (Ленинградская обл.). Дерново-подзолистые супесчаные разновидности почв различались по степени окультуренности: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). Схема опыта: контроль (без биоугля) и почва с биоуглем в дозе 20 т/га. Лабораторный эксперимент проводили в течение 7 мес. в вегетационных сосудах объемом 500 мл, инкубированием в биологическом шкафу при температуре 28°C при постоянной влажности почвы. Почва для лабораторного эксперимента отобрана в вариантах полевого эксперимента. Цель работы – оценка временных изменений кислотности почв и их емкости катионного обмена при внесении биоугля. В результате полевых исследований установлено, что внесение древесного биоугля в почву в дозе 20 т/га не оказало существенного влияния на изменение кислотности почвы как в варианте СОК, так и в варианте ВОК. Прослежен тренд снижения потенциальной кислотности на 0.2–0.3 ед. Внесение биоугля в почву способствовало повышению емкости катионного обмена почвы, в среднеокультуренной почве на 14.0%, в высокоокультуренной почве – на 18.5% по истечении 2-х лет. В лабораторном эксперименте сохранилась та же тенденция. Внесение биоугля привело к увеличению pH_{KCl} к окончанию инкубирования в варианте СОК на 0.4 ед., в варианте ВОК – на 0.2–0.3 ед. В регулируемых условиях внесение биоугля оказало положительное действие на увеличение ЕКО по сравнению с почвами без биоугля. Во всех вариантах почв с разной влажностью определено достоверное увеличение ЕКО в почвах с биоуглем по сравнению с почвами без биоугля ($p < 0.05$). Увеличение ЕКО к окончанию инкубирования произошло в варианте СОК на 9, в варианте ВОК – на 33%.

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

DOI: 10.31857/S0002188121090052

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для улучшения физико-химических свойств почв в качестве мелиоранта предлагают использовать биоуголь. Большинство биоуглей характеризуются щелочной реакцией, ввиду того, что во время карбонизации органического материала из него удаляются кислотные функциональные группы и происходит обогащение солями щелочных и щелочноземельных элементов [1]. Внесение данного продукта в почву рассматривают в качестве одного из способов снижения кислотности почвы. Однако длительность эффекта от разовой процедуры внесения

различных биоуглей в кислые почвы может быть различной и будет зависеть не только от дозы мелиоранта, но и от типа первоначального сырья, способа заделки и исходных почвенных условий.

Показано, что добавки биоугля в образцы песчаной и супесчаной почв в дозах 1–5% от массы снижали кислотность почвенной среды [2, 3]. Зафиксировано изменение величин рН водной и солевой вытяжек в 1.1–1.4 раза по сравнению с контролем в дерново-подзолистой песчаной почве при внесении в нее 2 и 5% биоугля [4]. В ходе краткосрочного вегетационного опыта установлено, что добавление древесного биоугля в коли-

честве 5% к дерново-подзолистой песчаной почве вызывало снижение почвенной кислотности [5]. Таким образом, в данном опыте при внесении биоугля в супесчаную почву в дозе как 5, так и 25 т/га, наблюдали увеличение pH_{KCl} почв. В опыте [6] внесение березового биоугля в дерново-подзолистую супесчаную почву в дозе 1–5% не вызвало значимых изменений в реакции среды и ЕКО. Авторы связали данный факт с тем, что в опыте в почву с нейтральной средой вносили биоуголь с кислой реакцией pH 5.4. В работе [3] отмечали, что эффект подщелачивания полезен для кислых почв, но может оказаться вредным для почв, имеющих нейтральную или слабощелочную реакцию. Повышение величин pH при внесении биоугля щелочной природы в кислые песчаные почвы отмечено в работах [7, 8].

Во многих литературных источниках выявлена тесная корреляционная связь между увеличением pH почвы и дозой биоугля [9]. Ученые обращают внимание, что мелиорирующий эффект “известкования биоуглем” зависит как от его количества, внесенного в почву, так и от исходного состава биомассы, из которой приготовлен биоуголь. Например, в работе [9] показано, что pH почвы изменяется интенсивнее при внесении биоугля из соломы бобовых растений, чем биоугля из бобовых культур. Например, pH почвы увеличился на 0.42–0.66 ед. после инкубации кислых почв с 1% биоугля из соломы риса, кукурузы или пшеницы и на 0.95–1.0 ед. при внесении биоугля из вики, сои или люпина.

Продолжительность влияния биоугля на кислотность почв остается предметом дискуссии. Например, в работе [10] отмечено значительное повышение pH почвы сразу после внесения древесного биоугля в почву и постепенное снижение этого показателя через 14 мес. При этом связывали ослабление эффекта известкования биоуглем в последующие годы с постепенным вымыванием щелочных соединений из продукта. Большинство ученых считает, что для нейтрализующего эффекта биоугля наиболее эффективно его вносить в почву каждые 3 года. Находясь в почве, биоуголь, как щелочной мелиорант, начинает менять свои кислотные показатели. Остается открытым вопрос, что происходит с почвенными свойствами при внесении биоугля в почву, и как долго сохраняется его мелиорирующий эффект.

Помимо минералогического и гранулометрического состава почвы, содержание органических веществ и карбоксильных групп оказывает влияние на емкость катионного обмена [11]. Высокая ЕКО означает, что почва может содержать значительное количество катионов, необходимых для роста и развития растений. При низком показате-

ле питательные вещества не связаны частицами гумуса и глины, поэтому легко вымываются в подпахотный слой. ЕКО различных биоуглей зависит от состава биомассы, температуры и скорости пиролиза [12, 13], поэтому сильно варьирует от 5 до 50 ммоль/100 г почвы [14, 15] и может даже достигать величин от 69 до 204 ммоль/100 г почвы [16, 17]. ЕКО в биоугле начинает меняться, когда продукт подвергается воздействию кислорода и воды, через изменение поверхностных функциональных групп оксигенации. Ряд исследований показал, что внесение биоугля увеличивает ЕКО почвы и содержание обменных Ca^{2+} и K^+ , что соответственно улучшает свойства почвы. В опыте [4] для дерново-подзолистой супесчаной почвы также было показано увеличение емкости катионного обмена в 1.1–1.5 раза прямо пропорционально увеличению pH среды. Характер изменения величин pH и ЕКО в тяжелосуглинистой почве имел ту же тенденцию, но она была выражена слабее.

Цель работы – оценка временных изменений кислотности почв и их емкости катионного обмена при внесении биоугля.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вегетационно-полевой эксперимент заложен на Агрофизическом стационаре Меньковской опытной станции (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) на дерново-подзолистых супесчаных почвах [18], различавшихся по степени окультуренности: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). Различия в степени окультуренности почв достигнуты внесением в почву в 2003–2005 гг. разных доз навоза крупного рогатого скота: 220 т/га для среднеокультуренной почвы и 540 т/га для высокоокультуренной почвы [19]. Опыт проводили в течение 2019–2020 гг. Схема опыта, варианты: 1 – контроль без биоугля (**К**) и 2 – почва с биоуглем в дозе 20 т/га (**Б**). Почва участков характеризовалась следующими агрохимическими параметрами. Среднеокультуренная почва имела pH_{KCl} 5.3, $C_{орг}$ – 1.53%, $N_{общ}$ – 0.17%, $N-NO_3$ – 16.4, $N-NH_4$ – 5.6 мг/кг почвы, подвижные (по Кирсанову) P_2O_5 – 255, K_2O – 112 мг/кг почвы. Высокоокультуренная почва имела pH_{KCl} 6.4, $C_{орг}$ – 2.92%, $N_{общ}$ – 0.28%, $N-NO_3$ – 22.3, $N-NH_4$ – 6.7 мг/кг почвы, подвижные (по Кирсанову) P_2O_5 – 994, K_2O – 542 мг/кг почвы.

В качестве биоугля использовали древесный уголь из березы сорта Премиум (береза 1-го класса), фракцию с размером частиц угля 0.5–5.0 см. Биоуголь произведен быстрым пиролизом при температуре 600°C. Химический состав биоугля: $C_{орг}$ – 88.9%, $N_{общ}$ – 0.43%, H – 3.2%, O – 5.1%, pH_{H_2O} 8.3, $W_{гв}$ – 3.1%, зольность – 1.8%. В экспе-

рименте использовали фракции биоугля <2 см в диаметре. Биоуголь в дозе 20 т/га вносили в верхний слой 0–10 см почвы. На делянках в 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 семян/га. В 2020 г. возделывали люпин белый сорт Дега (*Lupinus albus* L.) как сидерат под озимую пшеницу. Отбор почвенных образцов проводили по стандартной методике [20] с помощью почвенного бура из слоя 0–10 см через каждые 10–12 сут с момента закладки эксперимента.

Лабораторный опыт проводили в течение 7 мес. (с мая по декабрь) в регулируемых условиях: в вегетационных сосудах объемом 500 мл, инкубированием в биологическом шкафу при температуре 28°C и при постоянной влажности почвы, поддерживаемой поливом почвы до постоянного веса 3 раза в неделю. Почва для лабораторного эксперимента была отобрана из вариантов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности на Агрофизическом стационаре МОС-АФИ. Время отбора образцов почвы – конец апреля 2019 г. Почву предварительно высушивали при комнатной температуре и просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. В каждый сосуд вносили по 300 г воздушно-сухой почвы. Было задано 3 уровня содержания влаги в почве (табл. 1).

Исследованные почвы характеризовались различной наименьшей влагоемкостью (*НВ*). Поэтому, а также в связи с наблюдаемыми в последние годы в Ленинградской обл. регулярными засухой или переувлажнением почв, приняли решение изучить временную изменчивость основных характеристик почв при различных уровнях содержания влаги. Поддерживали следующие уровни содержания влаги, варианты: 1 – норма, которая соответствовала *НВ* почвы, 2 – ниже нормы, 3 – выше нормы.

В течение 7-ми сут, до внесения биоугля в почву, проводили предварительное инкубирование увлажненных образцов почвы в сосудах с целью достижения равновесного состояния микробного сообщества. Было заложено в каждом варианте 21 сосуд для почв с СОК и ВОК без биоугля и такое же количество для почв с внесением биоугля (всего 84 сосуда). Контрольные варианты без биоугля обозначены *К*, варианты с внесением биоугля – *Б*.

Кислотность почвы и емкость катионного обмена определяли с помощью стандартного метода (ГОСТ 26423-85, ГОСТ 17.4.4.01-84).

Все анализы выполнены в трехкратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ “Microsoft Excel”. Определены средние величины и

Таблица 1. Содержание влаги в почве в течение эксперимента

Почва	W, % от массы		
	Ниже нормы	Норма (<i>НВ</i>)	Выше нормы
СОК	19	21	23
ВОК	22	24	26

Примечание. СОК – среднеокультуренная, ВОК – высокоокультуренная почва. То же в табл. 2, на рис. 1–5.

их стандартные отклонения, корреляции Пирсона, достоверность различий средних при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики pH_{KCl} дерново-подзолистой супесчаной почвы разного качества в 2019 г. показал, что между вариантами почвы с разной степенью окультуренности наблюдали достоверные различия по показателю потенциальной кислотности ($p < 0.05$) в течение вегетационного периода (рис. 1а). В почве варианта СОКК pH_{KCl} варьировал от 5.3 ед. в начале вегетационного периода до 5.2 ед. к его окончанию, а в варианте ВОКК – соответственно от 6.4 до 6.2 ед.

Внесение в почву биоугля, обладавшим высоким pH , составлявшим 8.3 ед., позволило достоверно повысить pH_{KCl} в СОК почве с 5.3 до 5.5 ед., в ВОК почве – от 6.4 до 6.6 ед. Полученные результаты подтвердили мелиорирующую способность биоугля в снижении кислотности почвы, что согласовалось с результатами исследований зарубежных ученых [21, 22]. Улучшение данного показателя почв при использовании биоугля в качестве мелиоранта часто трактуется как один из наиболее эффективных подтвержденных механизмов повышения почвенного плодородия.

Исследование потенциальной кислотности почвы с разной окультуренностью в лабораторном эксперименте согласовались с данными полевого эксперимента (табл. 2). В контролируемых условиях и в отсутствии растительности pH_{KCl} почвы без биоугля снижался от начала инкубации к ее окончанию. Различная влажность почвы не влияла на величину данного показателя. В СОК почве pH_{KCl} варьировал от 5.3 до 5.0, в ВОК почве – от 6.4 до 6.6 ед.

Достоверные различия в величинах pH_{KCl} наблюдали только между вариантами с разной окультуренностью почвы ($p < 0.05$). Внесение биоугля привело к увеличению pH_{KCl} к окончанию инкубирования в варианте СОК на 0.4 ед., в варианте ВОК – на 0.2–0.3 ед.

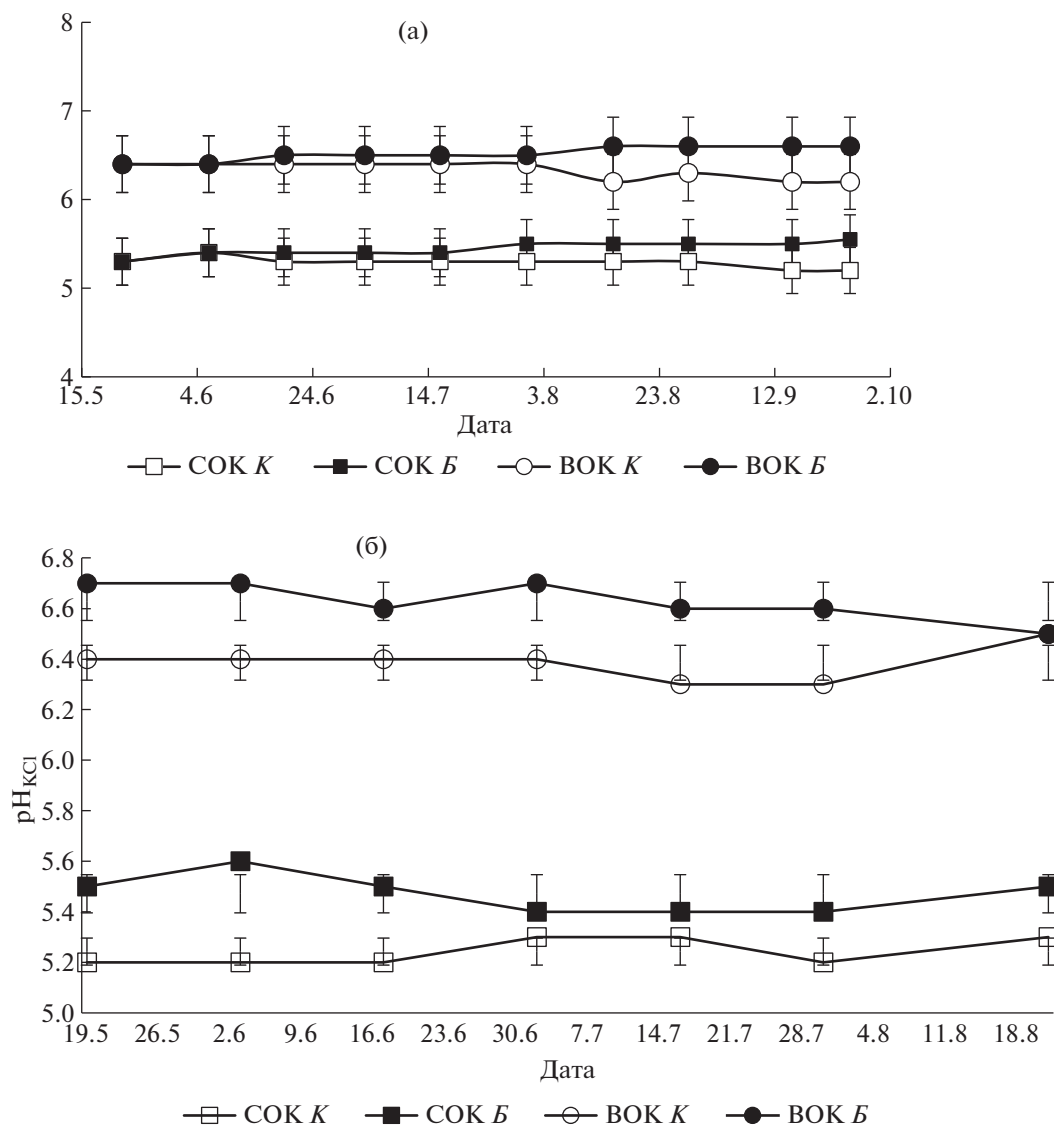


Рис. 1. Динамика pH_{KCl} дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной окультуренностью с внесением биоугля и без биоугля (полевой эксперимент): (а) – 2019 г., (б) – 2020 г.

Полевые исследования, проведенные в 2020 г., показали, что между вариантами почвы с различной степенью окультуренности наблюдали достоверные различия по показателю потенциальной кислотности ($p < 0.05$) в течение вегетационного периода (рис. 1б). В почве варианта СОКК данный показатель варьировал от 5.2 ед. в начале вегетационного периода до 5.3 ед. к его окончанию, в почве варианта ВОКК – соответственно от 6.4 до 6.5 ед. Внесение биоугля привело к повышению pH_{KCl} в варианте СОКБ до 5.5 ед., в варианте ВОКБ – до 6.7 ед. в начале периода наблюдений и до 6.5 ед. – в конце.

Полевые исследования 2019 г. показали, что величины емкости катионного обмена СОК почвы достоверно были меньше ($p < 0.05$) в среднем

на 17–20%, чем данный показатель в ВОК почве, что связано с различным содержанием органического вещества и физической глины в сравниваемых почвах. Предположили, что внесение биоугля в почву должно изменить величину емкости катионного обмена, судя по наличию большого количества карбоксильных групп ($-COOH$) 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.

Однако полевые исследования не подтвердили данный факт (рис. 2а). Внесение биоугля в дозе 20 т/га вызвало незначительное увеличение емкости катионного обмена в варианте СОКБ с

9.8 ммоль/100 г в начале вегетационного периода до 10.8 ммоль/100 г к его окончанию. В контрольном варианте СОК ЕКО также практически не изменялась в течение вегетации и варьировала от 10.2 до 9.8 ммоль/100 г.

В почве ВОК емкость катионного обмена незначительно уменьшилась к окончанию вегетационного периода, в контроле с 22.6 до 20.4 ммоль/100 г, в почве с биоуглем с 23.5 до 21.6 ммоль/100 г. Внесение биоугля вызвало незначительное увеличение ЕКО во всех вариантах опыта, в варианте СОК – на 10, в варианте ВОК – на 6%. Возможно, непродолжительное влияние биоугля и изменяющихся погодных условий на ЕКО оказалось недостаточным для ее достоверных изменений.

Результаты лабораторного эксперимента в 2019 г. показали, что почва с ВОК изначально обладала более высокой емкостью катионного обмена, в среднем в 2 раза выше по сравнению с почвой СОК, в связи с большей гумусированностью почвы и реакцией среды. В регулируемых условиях внесение биоугля оказало положительное действие на увеличение ЕКО по сравнению с почвами без биоугля. Во всех вариантах почв с разной влажностью определено достоверное увеличение ЕКО в почвах с биоуглем по сравнению с почвами без биоугля ($p < 0.05$). Также во всех вариантах эксперимента наблюдали одинаковый характер динамики изменения ЕКО, а именно, уменьшение данного показателя от начала инкубации к ее окончанию. Установлено (рис. 3), что емкость катионного обмена СОК почвы в слое 0–10 см уменьшалась в течение эксперимента при 3-х уровнях заданной влажности как в контроле, так и в почве с внесением биоугля, и варьировала от 11.9 до 10.0 ммоль/100 г в почве контрольного варианта и от 13.7 до 10.9 ммоль/100 г в почве с биоуглем.

Такая же тенденция зафиксирована в почве с ВОК. В контрольном варианте данной почвы величины ЕКО снижались от 25.4 до 17.3 ммоль/100 г. В варианте ВОКБ величины емкости катионного обмена варьировали в меньшем диапазоне – от 26 до 23 ммоль/100 г. Максимальные средние величины емкости катионного обмена отмечены в вариантах с наибольшим содержанием влаги в обеих почвах.

Таким образом, в контролируемых условиях наблюдали снижение емкости катионного обмена в процессе инкубирования почвы на 8–20% в СОК почве и на 12–32% в ВОК почве от начала к окончанию периода наблюдений в обоих вариантах. Считается, что емкость катионного обмена строго увеличивается по мере повышения степени окисления биоугля (увеличение отношения $O : C$), его устойчивость к воздействию абиотиче-

Таблица 2. Динамика pH_{KCl} дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной окультуренностью в вариантах с внесением и без внесения биоугля (лабораторный опыт)

Почва	Вариант	Время инкубирования, сут						
		1	30	62	93	122	154	184
СОК	<i>KW19</i>	5.3	5.2	5.2	5.1	5.1	5.0	5.0
	<i>BW19</i>	5.5	5.5	5.6	5.6	5.5	5.5	5.4
	<i>KW21</i>	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.1	5.1
	<i>BW21</i>	5.5	5.5	5.6	5.6	5.6	5.5	5.5
	<i>KW23</i>	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.1
	<i>BW23</i>	5.4	5.5	5.6	5.6	5.6	5.5	5.5
<i>HCP₀₅</i>		0.4						
ВОК	<i>KW22</i>	6.4	6.4	6.3	6.3	6.3	6.2	6.2
	<i>BW22</i>	6.4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.4
	<i>KW24</i>	6.4	6.4	6.4	6.3	6.3	6.2	6.2
	<i>BW24</i>	6.5	6.5	6.6	6.6	6.6	6.5	6.5
	<i>KW26</i>	6.4	6.4	6.4	6.3	6.3	6.2	6.2
	<i>BW26</i>	6.5	6.5	6.6	6.6	6.6	6.5	6.5
<i>HCP₀₅</i>		0.5						

Примечание. *K* – контроль, *B* – почва с биоуглем, *W* – влажность почвы, числа 19, 21, 22, 23, 24, 26 – влажность почвы в %.

ских и биотических факторов уменьшается [23]. Поэтому увеличение емкости катионного обмена и буферной способности биоугля должно происходить только за счет повышения степени окисленности поверхностного слоя угля под воздействием абиотических и биотических факторов. Снижение емкости катионного обмена исследованных почв могло быть обусловлено уменьшением плотности карбоксильных групп на поверхности твердой фазы почвы и биоугля в результате их конденсации или взаимодействия с другими функциональными группами [24].

Внесение биоугля в дозе 20 т/га вызвало увеличение емкости катионного обмена в 2020 г. в СОК почве в среднем на 14% по сравнению с ЕКО почвы в контрольном варианте (рис. 2б). Внесение биоугля в ВОК почву вызвало увеличение данного показателя на 18.5%. Известно, что в реакциях катионного обмена почвенный поглощающий комплекс проявляет себя как анион кислотной природы. На его поверхности существуют сильно-кислотные и слабокислотные обменные позиции, определяемые по гетерополярному (ионному) и ковалентному (полярному) связыванию обменно-адсорбируемых водородных ионов. Внесение биоугля определяет освобождение мест обмена в ППК, блокированных ранее алюминием, и является следствием его осаждения в виде нерастворимых гидроксидов и вовлечением в реакции об-

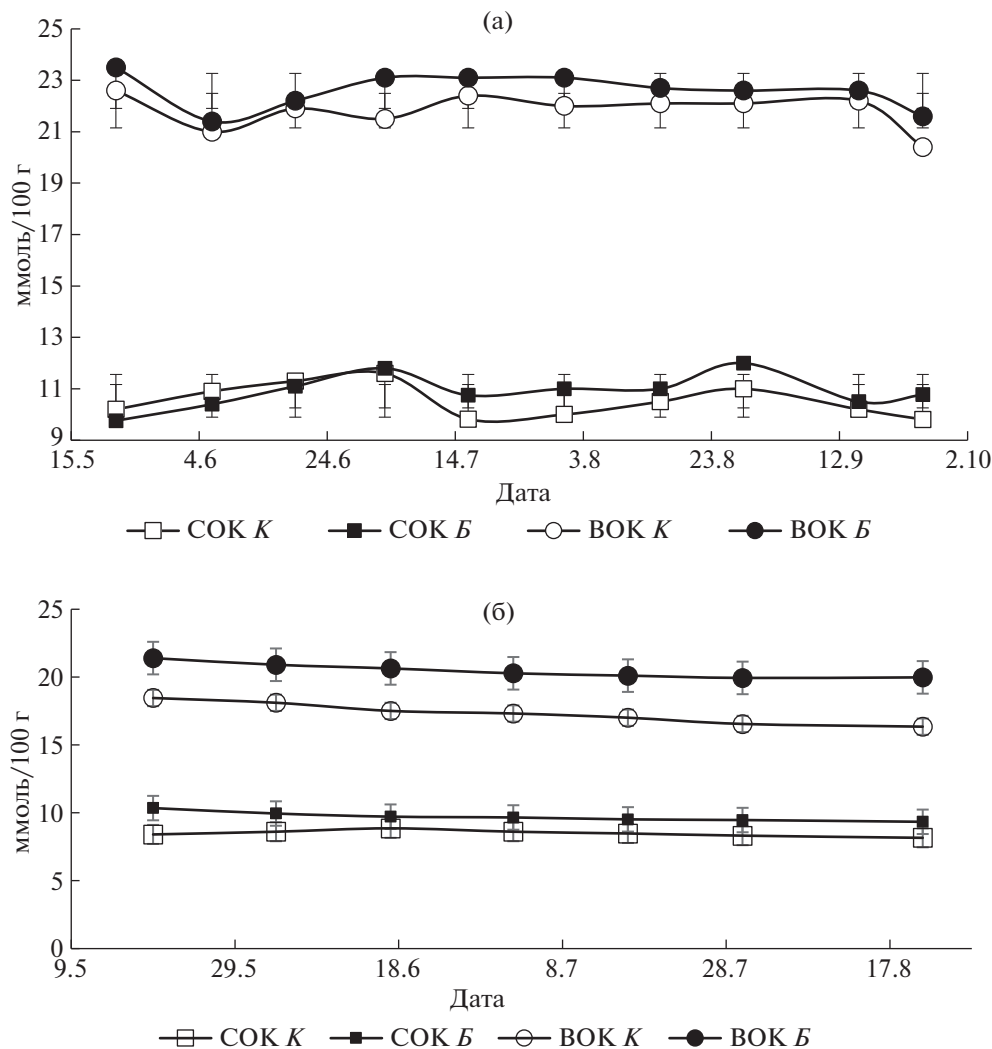


Рис. 2. Изменение ЕКО дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной окультуренностью с биоуглем и без биоугля (полевой эксперимент): (а) – 2019 г., (б) – 2020 г.

мена карбоксильных и отчасти гидроксильных групп гумусовых веществ.

В 2020 г. средние величины емкости катионного обмена СОК почвы были достоверно ниже ($p < 0.05$) в 2 раза, чем данный показатель в ВОК почве, что связано с различным содержанием органического вещества, карбоксильных групп и физической глины в сравниваемых почвах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесный биоуголь, внесенный в почвы из расчета 20 т/га, не оказывал существенного влияния на изменение кислотности, как в среднеокультуренной (СОК) почве, так и в высокоокультуренной (ВОК). Прослежен тренд снижения кислотности на 0.2–0.3 ед. рН, соответственно в вариантах с различной степенью окультуренности.

Полевые исследования 2020 г. показали, что величины ЕКО в изученных почвах по сравнению с 2019 г. снизились: в почве контрольных вариантов на 19–20, в вариантах с биоуглем – на 11%. Внесение биоугля в почву способствовало повышению емкости катионного обмена почвы в среднеокультуренной почве на 14.0, в высокоокультуренной – на 18.5% по истечении 2-х лет. Корреляционный анализ выявил в полевом опыте 2019 г. среднюю положительную связь между величинами $r_{\text{Н}_{\text{КCl}}}$ и ЕКО для среднеокультуренной почвы ($r = 0.40–0.44$). В опыте 2020 г. зафиксировали среднюю положительную связь между величинами $r_{\text{Н}_{\text{КCl}}}$ и ЕКО в вариантах с биоуглем ($r = 0.47–0.68$), при этом данная связь была теснее для высокоокультуренной почвы. Двухфакторный дисперсионный анализ выявил в полевом эксперименте 2019 г. преимущественное положительное влия-

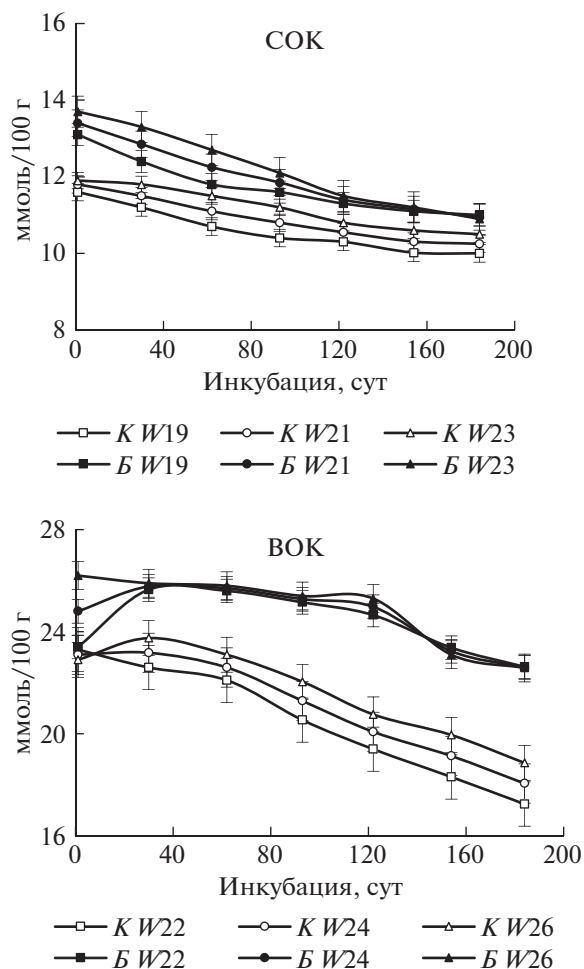


Рис. 3. Изменение емкости катионного обмена (лабораторный опыт) дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной окультуренностью при различной влажности почвы (2019 г.).

ние на величины pH_{KCl} и ЕКО степени окультуренности почвы, $F_{факт} > F_{крит}$ ($4946.77 > 161.45$ для pH_{KCl} , $3468.9 > 161.45$ для ЕКО при $p < 0.01$). В полевом эксперименте 2020 г. зафиксировано положительное влияние на изменение pH_{KCl} почвы 2-х факторов: дозы органических удобрений и внесения биоугля ($F_{факт} > F_{крит}$). Однако степень окультуренности оказала большее влияние на изменение pH_{KCl} , чем внесение биоугля ($53361 > 161.45$ для pH , при $p < 0.002$ и $2209 > 161.45$ для pH_{KCl} , при $p < 0.01$ соответственно). Влияние степени окультуренности почвы и внесения биоугля на ЕКО в 2020 г. не выявили.

Внесение биоугля в лабораторном эксперименте привело к увеличению pH_{KCl} к окончанию инкубирования в варианте СОК на 0.4 ед., в варианте ВОК – на 0.2–0.3 ед. В регулируемых условиях внесение биоугля оказало положительное

действие на увеличение ЕКО по сравнению с почвами без биоугля. Во всех вариантах почв с разной влажностью показано достоверное увеличение ЕКО в почвах с биоуглем по сравнению с почвами без биоугля ($p < 0.05$). Увеличение ЕКО к окончанию инкубирования произошло в варианте СОК на 9, в варианте ВОК – на 33%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fuertes A.B., Camps-Arbestain M., Sevilla M., Maciá-Agulló J.A., Fiol S., López R., Smernik R.J., Aitkenhead W.P., Arce F., Macías F.* Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover // *Soil Res.* 2010. V. 48. P. 618–626.
2. *Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А.* Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // *Труды Карел. НЦ РАН.* 2020. № 3. С. 31–44. <https://doi.org/10.17076/eb1087>
3. *Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Иванова Т.Г., Попеня М.В., Войникова Е.В.* Характеристики дерново-подзолистых почв после внесения биоугля // *Изв. НАН Беларуси. Сер. хим. науки.* 2015. № 2. С. 87–94.
4. *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/AE.2019.51.56.004>
5. *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>
6. *Григорьян Б.Р., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Сунгатулина Л.М., Кольцова Т.Г., Рязанов С.С.* Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // *Вестн. технол. ун-та.* 2016. Т. 19. № 11. С. 185–189.
7. *Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // *Агрохимия.* 2016. № 9. С. 46–53.
8. *Дубровина И.А.* Пролонгированное влияние биоугля на агрохимические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы // *Мат-лы Международ. научн. семинара “Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду”.* АФИ, С.-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г. СПб.: АФИ, 2020. С. 28–30.
9. *Yuan J.H., Xu R.K., Zhang H.* The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures // *Biores. Technol.* 2011. V. 102. P. 3488–3497.
10. *Cornelissen G., Nurida N.L., Hale S.E., Martinsen V., Silvani L., Mulder J.* Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons

- in an Indonesian Ultisol // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 634. P. 561–568.
11. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 326 с.
 12. Budai A., Wang L., Gronli M., Strand L.T., Antal M.J., Abiven S. Surface properties and chemical composition of corncob and miscanthus biochars: effects of production temperature and method // *J. Agric. Food Chem.* 2014. V. 62. P. 3791–3799.
 13. Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.-M., Dallmeyer I., Garcia-Perez M. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties // *Biomass and Bioenergy.* 2016. V. 84. P. 37–48.
 14. Agegnehu G., Bass A.M., Nelson P.N., Bird M.I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 543. P. 295–306.
 15. Berek A.K., Hue N.V. Characterization of biochars and their use as an amendment to acid soils // *Soil Sci.* 2016. V. 181. P. 412–426.
 16. Lou Y., Joseph S., Li L., Graber E.R., Liu X., Pan G. Water extract from straw biochar used for plant growth promotion // *Initial Test. Biores.* 2016. V. 11. P. 249–266.
 17. Pandit N.R., Mulder J., Hale S.E., Martinsen V., Schmidt H.P., Cornelissen G. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 625. P. 1380–1389.
 18. Моисеев К.Г., Гончаров В.Д., Зинчук Е.Г., Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Гуринов 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 регистрации базы данных RU2013620682. Заяв. № 2013620301 от 22.03.2013.
 19. Оленченко Е.А., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // *Агрофизика.* 2012. № 4. С. 8–18.
 20. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
 21. Ajayi A.E., Horn R. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar // *Soil Till. Res.* 2016. V. 164. P. 34–44.
 22. Glaser B., Lehmann J., Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review // *Biol. Fertil. Soils.* 2002. V. 35. № 4. P. 219–230.
 23. Spokas K.A., Novak J.M., Stewart C.E., Cantrell K.B., Uchimiya M., DuSaire M.G., Ro K.S. Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar // *Chemosphere.* 2011. V. 85. № 5. P. 869–882.
 24. Bakshi S., Aller D.M., Laird D.A., Chintala R. Comparison of the physical and chemical properties of laboratory and field-aged biochars // *J. Environ. Qual.* 2016. V. 45. № 5. P. 1627–1634.

Dynamics of Acidity and Cation Exchange Capacity in Sandy Loam Sod–Podzolic Soil after Application of Biochar

L. V. Boitsova^{a, #}, E. Y. Rizhiya^{a, b}, and V. I. Dubovitskaya^a

^a Agrophysical Research Institute

Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia

^b Russian State Hydrometeorological University

Voronezhskaya ul. 79, St. Petersburg 192007, Russia

[#]E-mail: larisa30.05@mail.ru

In a two-year vegetation-field experiment and a 7-month laboratory experiment, applying biochar at a dose of 20 t/ha into sod-podzolic soils with different soil fertility (medium soil fertility and high soil fertility) on the values of acidity and cation exchange capacity were studied. The vegetation-field experiment was established at the Agrophysical Station MOS-AFI (Leningrad region). Experiment scheme: control (without biochar) and soil with biochar at a dose of 20 t/ha. A laboratory experiment with soils selected from the field experiment was carried out for 7 months in growing vessels with a volume of 500 ml, incubating in a biological safety cabinet at a temperature of 28°C at constant soil moisture. The purpose of the experiments is to assess the temporal changes in soil acidity and their cation exchange capacity upon introducing biochar. Application of wood biochar into the soil at a 20 t/ha dose did not significantly affect the change in soil acidity, both in the soils with medium (MF) and high fertility (HF). There was only a trend towards a decrease in potential acidity by 0.2–0.3 units. After two years of biochar application to the soils, an increase in the soil's cation exchange with MF by 14.0 and with HF by 18.5% was found. In a laboratory experiment, the same trend persisted. The incorporation of biochar led to increased pH_{KCl} by the end of incubation in the soil with medium fertility by 0.4 units, in the high fertility by 0.2–0.3 units. Under controlled conditions, biochar's application positively affected increasing CEC compared to soils without biochar. In all variants of soils with different moisture content, a significant increase in CEC was determined in soils with biochar compared to soils without biochar ($p < 0.05$). An increase in CEC by the end of incubation occurred in the soil with medium fertility by 9, in the soil with high fertility – by 33%.

Key words: potential acidity, cation exchange capacity, woody biochar, Sod-podzolic soil, soil fertility.