

УДК 631.417:631.445.24:631.878

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ

© 2022 г. Л. В. Бойцова^{1,*}, Е. Я. Рижия², В. Е. Вертебный¹

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79, Россия

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

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 14.06.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

В трехлетнем мелкоделяночном опыте изучили влияние внесения биоугля на содержание индивидуальных органических соединений (низкомолекулярных фенолов, лигнина, липидоподобных соединений, углеводов) в дерново-подзолистой супесчаной почве. 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. Определение общего органического углерода ($C_{орг}$) осуществляли по методу Тюрина, общего азота ($N_{общ}$) – по Кьельдалю. Определение углеводов проводили фенолсернокислым методом Дюбуа, фенолов – по ПНД Ф 16.1:2.3:3.44-05, лигнина – по методике, описанной в [1]. Внесение биоугля привело к увеличению содержания $C_{орг}$ в СОК-почве на 0.08%, в ВОК-почве – на 0.34%. За 3 года эксперимента наблюдали тенденцию к накоплению лигнина. В вариантах СОК произошло увеличение содержания лигнина на 0.5–0.9 г/кг почвы, в вариантах ВОК – на 0.3–0.5 г/кг почвы, при этом наибольшее накопление было характерно для вариантов с биоуглем. Зафиксировано снижение содержания простых фенольных соединений с течением времени во всех вариантах опыта приблизительно в 2 раза. Можно отметить, что внесение биоугля не привело к какому-либо значительному изменению содержания липидоподобных соединений и углеводов в СОК- и ВОК-почве.

Ключевые слова: почва, фенолы, лигнин, липидоподобные соединения, углеводы.

DOI: 10.31857/S0002188122110035

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в качестве мелиоранта используют биоуголь. Биоуголь влияет на физические, физико-химические, химические свойства почвы [1–4]. Влияние и последствие биоугля на органическое вещество почвы по-прежнему является не достаточно изученным аспектом.

Индивидуальные органические вещества контролируют многие биогеохимические реакции, в значительной степени определяя темпы деструкции органического вещества почвы и оказывая влияние на циклы питательных веществ и ферментативную активность микроорганизмов. К индивидуальным компонентам почвенного органического вещества относятся углеводы, липиды, лигнин, фенолы [5].

Фенолы относят к числу самых распространенных в окружающей среде органических веществ более 8000 соединений на сегодняшний день отнесено к фенолам – от низкомолекулярных соединений до сложных [6]. В природе они обнаруживаются в различных растениях (до 60% сухой массы растений [7]), почвах, торфах, каменных углях и сланцах, относятся к основным органическим загрязнителям воды и почвы и подлежат обязательному контролю [8]. Наряду с гуминовыми веществами фенольные соединения представляют собой самые крупные составляющие и наиболее активные фракции органического вещества почвы [9]. Фенолы, присутствующие в растительности в качестве метаболитов, являются основным источником фенольных соединений в почве [10]. Типы и концентрации фенольных со-

единений зависят от вида растительности, от ряда биотических и абиотических факторов [11].

Другой важный компонент гумусовых веществ в почве — лигнин, который является 2-м компонентом после углеводов по распространенности в природе, имеет растительное происхождение и исключительную устойчивость к микробным атакам [12].

Деградация лигнина происходит при наличии кислорода и в присутствии специализированных микроорганизмов [5]. При этом лигнин выступает в образовании гуминовых соединений как главный поставщик циклических соединений [13]. Лигнин выводит углерод из его круговорота на значительные периоды времени, входя своими ароматическими структурами в состав гуминовых кислот.

Накопление почвенного органического вещества, богатого алифатическими соединениями, связано с поступлением липидов в основном из растительности при высокой активности микроорганизмов и низком уровне рН почвы [14, 15]. Липидный состав почвы зависит от вида растений, произрастающих на ней. Например, в работе [16] наблюдали изменение липидного состава глеевой камбисоли в результате смены растительности с зеленого пара на пшеницу спустя 4 года. Липиды являются также источником энергии для микроорганизмов.

Углеводы играют важную роль в наземном цикле углерода, участвуют в установлении и функционировании микоризных симбиозов и стабилизации тяжелых металлов в почве [17, 18], являются источником углерода и энергии для микроорганизмов почв, способствуют созданию структуры почвы. Определение почвенных углеводов связано с оценкой влияния землепользования на состояние органического вещества почвы главным образом с точки зрения его микробной трансформации [19]. Цель работы — изучение содержания индивидуальных органических соединений в почвах с биоуглем.

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.).

Мелкоделяночный опыт заложен на Агрофизическом стационаре МОС–АФИ. Почвы стационара представлены дерново-подзолистыми супесчаными разновидностями [20]. Данные почвы различались по степени окультуренности и каче-

ству: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). В 2003–2005 гг. в среднеокультуренную почву внесли навоз КРС 220 т/га, в высокоокультуренную почву — 540 т/га. Опытные делянки размером 4 м² (2 × 2 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) и 2 — почва с биоуглем в дозе 20 т/га. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой супесчаной почвы, использованной в опыте (исходные данные на начало 2019 г), была следующей. Почва СОК: рН_{KCl} 5.3, содержание C_{орг} — 1.53%, N_{общ} — 0.17%, N-NO₃ — 16.4 мг/кг; N-NH₄ — 5.6 мг/кг, подвижных P₂O₅ — 255, K₂O = 112 мг/кг; почва ВОК: рН_{KCl} 6.4, содержание C_{орг} — 2.92%, N_{общ} — 0.28%, N-NO₃ — 22.3, N-NH₄ — 6.7 мг/кг, подвижных P₂O₅ — 994, K₂O — 542 мг/кг.

В качестве биоугля использовали древесный уголь из березы сорта “Премиум” (береза 1-го класса), фракция с размером частиц угля 0.5–5.0 см, произведен быстрым пиролизом при температуре 600°C на предприятии ООО “Файервуд” (Ленинградская обл, Тосненский р-н, д. Коркино). Химическая характеристика биоугля: C_{орг} = 88.9, N_{общ} — 0.43%, C : N = 207, H — 3.2%, O = 5.1%, рН_{H₂O} 8.3; W_{гв} (гигроскопическая влажность) — 3.1, зольность — 1.8%. Перед внесением в почву биоуголь просеивали через сито с размером ячейки 2 см. Биоуголь в дозе 20 т/га (или 8 кг/4 м²) вносили в верхний 0–10-см слой почвы вручную.

На делянках в течение вегетационного периода 2019 г. в качестве тест-объекта выращивали 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 по 85 г/4 м²). В 2020 г. возделывали люпин белый сорт Дега (*Lupinus albus* L.) как сидерат под озимую пшеницу. В 2021 г. возделывали озимую пшеницу сорта Немчиновская 85.

В начале и в конце вегетационных периодов 2019–2021 гг. производили отбор образцов на определение содержания низкомолекулярных соединений и лигнина в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности с биоуглем и без биоугля. Отбор почвенных образцов в вариантах опыта проводили по стандартной методике [21] из слоя 0–10 см. Определяли влажность и температуру почвы [22].

Таблица 1. Содержание общего органического углерода и общего азота в дерново-подзолистой супесчаной почве (К – контроль, Б – биоуголь)

Показатель, %	Срок отбора	Почва	СОК			ВОК		
		Вариант/Год	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
C _{орг}	Начало вегетационного периода	К	1.53 ± 0.02	1.54 ± 0.08	1.52 ± 0.24	2.92 ± 0.04	2.98 ± 0.03	2.95 ± 0.23
		Б	–	1.57 ± 0.13	1.58 ± 0.09	–	3.16 ± 0.09	3.21 ± 0.24
	Окончание вегетационного периода	К	1.49 ± 0.09	1.56 ± 0.08	1.55 ± 0.12	2.95 ± 0.08	2.99 ± 0.11	3.00 ± 0.05
		Б	–	1.62 ± 0.04	1.62 ± 0.06	–	3.19 ± 0.06	3.26 ± 0.13
N _{общ}	Начало вегетационного периода	К	0.17 ± 0.01	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.22	0.28 ± 0.02	0.29 ± 0.04	0.29 ± 0.06
		Б	–	0.18 ± 0.04	0.18 ± 0.27	–	0.31 ± 0.08	0.32 ± 0.05
	Окончание вегетационного периода	К	0.17 ± 0.06	0.17 ± 0.05	0.17 ± 0.01	0.28 ± 0.0.8	0.29 ± 0.07	0.29 ± 0.09
		Б	–	0.18 ± 0.03	0.18 ± 0.14	–	0.31 ± 0.11	0.33 ± 0.12

Примечание. СОК – почва со средней степенью окультуренности, ВОК – почва с высокой степенью окультуренности, К – почва-контроль (без биоугля), Б – почва с биоуглем, C_{общ} – содержание общего органического углерода, N_{общ} – содержание общего азота. То же в табл. 2.

Определение общего органического углерода осуществляли по методу Тюрина, общего азота – по Кьельдалю [22]. Определение углеводов проводили фенолсернокислым методом Дюбуа [23]. Навеску почвы помещали в центрифужную пробирку, добавляли 1 мл H₂O, 1 мл 5%-ного раствора фенола, 5 мл концентрированной серной кислоты. После остывания смесь центрифугировали и определяли оптическую плотность раствора при длине волны 488–490 нм. Содержание углеводов рассчитывали по калибровочному графику с использованием стандартного раствора глюкозы, определение липидоподобных веществ проводили с использованием аппарата Сокслета [23]. Определение фенолов проводили по ПНД Ф 16.1: 2.3 : 3.44–05. Определение лигнина производили по методике, подробно описанной в [1].

Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом [22], температуру – с использованием электронных датчиков iButton DS 1921 (Dallas Semiconductor, США), установленных на глубине 10 см с дальнейшей расшивкой в программе 1-Wire Net.

Статистическая обработка результатов включала вычисления средних, стандартных отклонений, корреляций Пирсона. Достоверность различий средних и влияния факторов оценивали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение биоугля привело к незначительному увеличению содержания как общего органического углерода, так и азота в почве обоих изученных вариантов (табл. 1).

Показателем, характеризующим качество органического вещества почвы, является углерод-азотное соотношение (C : N). Большинство гумусовых горизонтов имеет данную величину, равную 8–10 [24]. В опыте за весь период наблюдений данное соотношение в почве СОК составило 9, в почве ВОК – 10, за исключением варианта ВОК-К (контроль) по окончании вегетационного периода 2019 г., где данный показатель был равен 11.

Внесение биоугля приводило к изменению содержания некоторых индивидуальных органических компонентов почвы. Анализ полученных результатов 3-летнего полевого эксперимента выявил общую тенденцию к уменьшению содержания фенолов (табл. 2). В мета-анализе сообщили о более низком уровне фенолов в условиях потепления [25]. Однако повышение температуры приводит как к уменьшению содержания фенолов, так и к их увеличению [26]. Исходное содержание фенолов в высокоокультуренной почве было больше, чем в среднеокультуренной на 8%. К окончанию 3-х лет вегетации наблюдали снижение содержания фенолов в среднеокультуренной почве на 48%. В высокоокультуренной почве данное снижение составило 46%. Внесение в почву биоугля привело к незначительному повышению содержания фенолов относительно контрольных вариантов. В вариантах СОК внесение биоугля способствовало увеличению содержания фенолов в почве на 6, в варианте ВОК – на 5%.

В почве фенолы разлагаются в основном грибами (например, базидиомицетами) и бактериями (например, псевдомонадами). Данные микроорганизмы выделяют внеклеточные ферменты в почву, разрушающие фенольные соединения. Ферменты, разлагающие фенолы, называют полифенолоксидазой и пероксидазой [27].

Таблица 2. Изменение содержания неспецифических органических соединений в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности с биоуглем и без биоугля в начале и по окончании вегетационных периодов 2019–2021 гг.

Вариант	2019 г.		2020 г.		2021 г.	
	22.05	25.09	19.05	21.08	25.05	25.08
Содержание фенолов, мг/кг						
СОК-К	1.32 ± 0.15	0.852 ± 0.070	0.820 ± 0.066	0.712 ± 0.057	0.715 ± 0.057	0.638 ± 0.051
СОК-Б	–	0.970 ± 0.078	0.834 ± 0.067	0.736 ± 0.059	0.764 ± 0.061	0.679 ± 0.054
ВОК-К	1.44 ± 0.16	0.884 ± 0.071	0.825 ± 0.066	0.729 ± 0.058	0.708 ± 0.057	0.663 ± 0.053
ВОК-Б	–	0.951 ± 0.076	0.850 ± 0.068	0.821 ± 0.066	0.752 ± 0.060	0.695 ± 0.055
Содержание лигнина, г/кг почвы						
СОК-К	0.6 ± 0.09	0.8 ± 0.1	0.81 ± 0.1	1.18 ± 0.011	0.71 ± 0.1	1.11 ± 0.010
СОК-Б	–	0.81 ± 0.09	0.89 ± 0.11	1.29 ± 0.12	0.87 ± 0.08	1.48 ± 0.15
ВОК-К	1.30 ± 0.20	1.50 ± 0.21	1.34 ± 0.12	1.39 ± 0.13	1.06 ± 0.10	1.61 ± 0.15
ВОК-Б	–	1.54 ± 0.23	1.63 ± 0.15	1.71 ± 0.15	1.44 ± 0.13	1.79 ± 0.16
Содержание, липидоподобных соединений, г/кг почвы						
СОК-К	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.20 ± 0.03
СОК-Б	–	0.21 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.18 ± 0.03	0.20 ± 0.03	0.18 ± 0.03
ВОК-К	0.21 ± 0.03	0.21 ± 0.03	0.21 ± 0.03	0.23 ± 0.03	0.24 ± 0.03	0.21 ± 0.03
ВОК-Б	–	0.21 ± 0.03	0.23 ± 0.03	0.25 ± 0.04	0.21 ± 0.02	0.26 ± 0.04
Содержание гидролизуемых углеводов, г/кг почвы						
СОК-К	4.26 ± 0.72	3.03 ± 0.54	4.12 ± 0.74	4.31 ± 0.77	0.70 ± 0.13	0.60 ± 0.11
СОК-Б	–	3.13 ± 0.56	4.51 ± 0.81	4.57 ± 0.82	0.60 ± 0.11	0.70 ± 0.13
ВОК-К	5.09 ± 0.86	3.44 ± 0.62	4.98 ± 0.89	5.11 ± 0.92	1.60 ± 0.29	1.30 ± 0.23
ВОК-Б	–	5.20 ± 0.94	5.17 ± 0.93	5.47 ± 0.99	1.00 ± 0.18	0.70 ± 0.13

На разложение фенолов влияют факторы окружающей среды, такие как рН почвы, температура, доступность кислорода, состав субстрата. В исследовании авторов данной статьи для описываемого объекта отмечен факт увеличения пероксидазной активности и уменьшения полифенолоксидазной активности при увеличении температуры [28]. Известно, что пероксидаза в большей степени способствует минерализации органического вещества почвы, что могло привести к снижению концентрации фенолов в почве. Корреляционная связь между содержанием фенолов в почве и ее температурой и влажностью носила слабый положительный характер: $r = 0.03–0.22$, величины коэффициентов были недостоверными ($p = 0.05$).

В растениях лигнин является инертным конечным продуктом, который уже не привлекается к метаболизму и выполняет лишь механические функции. Лигнин устойчив к воздействию микроорганизмов. В разложении лигнина в аэробных условиях принимают участие *Basidiomycetes*, а также бактерии рода *Pseudomonas*. В анаэробных условиях лигнин разлагается при участии бактерий рода *Clostridium*. Считают, что лигнин может трансформироваться и актиномицетами. В связи с тем, что лигнин разрушается относительно мед-

ленно, он накапливается в почве. Образование гумуса из лигнина происходит под влиянием ферментов грибов и бактерий во влажных условиях и при ограниченном доступе кислорода, т.е. практически в анаэробных условиях. Дегградация лигнина происходит под воздействием внеклеточных ферментов-оксидоредуктаз грибов.

Содержание лигнина в течение 3-х вегетационных периодов увеличивалось к окончанию каждого вегетационного периода, наблюдали и его увеличение по истечении 3-летнего эксперимента во всех вариантах опыта: в варианте СОК – в 1.9 раза, в варианте СОК-Б (биоуголь) – в 2.5 раза, в варианте ВОК – в 1.2 раза, в варианте ВОК-Б – в 1.4 раза по сравнению с началом эксперимента. Такое распределение содержания лигнина по годам связано прежде всего с видом выращиваемых культур, в частности с соотношением С : N в растительных остатках и погодными условиями. В работе [12] показано увеличение скорости минерализации лигнина с увеличением углерод-азотного соотношения в материале в течение первых 7-ми сут, затем в течение 7–12 сут скорости минерализации лигнина с разным С : N не отличались, далее до конца опыта (61-е сут) отмечена отрицательная логарифмическая зависимость скорости минерализации от величины С : N. Показано вли-

ание состава разлагающегося материала и температуры: в работе [29] обнаружили, что повышение температуры от 7 до 37°C значительно увеличивало скорость разложения лигнина.

В опыте содержание лигнина в целом было больше в почве с высокой степенью окультуренности. В начале периода наблюдений величина данного параметра в почве ВОК была в 2 раза больше, чем в почве СОК. По окончании 3-летнего периода наблюдений разница между контрольными вариантами составила 31%. Внесение биоугля увеличило содержание лигнина к окончанию эксперимента в почве СОК на 25, в почве ВОК – на 10% по сравнению с контрольными вариантами. По величине соотношения лигнин: N можно судить о качестве растительных остатков и скорости их разложения [30]. В описываемом опыте качество растительных остатков было высоким и скорость разложения – быстрой, т.к. соотношение лигнин: N было <5 во всех вариантах опыта, за весь период исследования. Данные корреляционного анализа показали достоверное ($p = 0.05$) увеличение накопления лигнина в почве с уменьшением ее влажности: $r = -0.09...-0.66$.

Почва опыта характеризовалась низким уровнем содержания липидоподобных соединений. Известно, что накопление липидов в гумусовых горизонтах почв находится в обратной зависимости от степени гумификации. В почвах с высокой степенью гумификации органического вещества (ОВ) содержание липидов низкое. Содержание липидов в верхних горизонтах составляет 3–8%, редко превышает 10% от общего органического углерода. В описываемом опыте содержание липидов было больше в почвах с высокой степенью окультуренности. Изначально перед внесением биоугля данная разница составляла 1.5 раза. По окончании 3-х лет опыта разница между контрольными вариантами была незначительная и составляла 5%. Внесение биоугля не способствовало значительному изменению содержания липидоподобных соединений. Внесение биоугля в среднеокультуренную почву привело к уменьшению содержания липидоподобных веществ по окончании 3-летней вегетации на 10%. Биоуголь в почве ВОК способствовал увеличению содержания липидоподобных веществ на 24%. В почве опыта наблюдали тенденцию к увеличению содержания данных веществ при применении биоугля как в вариантах СОК, так и в вариантах ВОК. Корреляционная связь между содержанием липидов в почве СОК и ее температурой и влажностью носила положительный недостоверный характер: $r = 0.1-0.48$. В почве ВОК отмечена связь противоположного характера: $r = -0.02...-0.77$. При этом в варианте ВОК с биоуглем коэффициент корреляции был достоверным ($p = 0.05$).

Почвенные углеводы составляют от 5 до 25% почвенного органического вещества [31]. Отмечено, что $\approx 30\%$ растворимого почвенного органического углерода пахотных земель приходится на долю углеводов [32]. Для перевода абсолютного количества углеводов на содержание углерода углеводов используют коэффициент 0.4 [5].

По окончании вегетационного периода 2020 г. отмечали увеличение содержания углеводов во всех вариантах. В вариантах с биоуглем данное увеличение было несколько больше. Однако в 2021 г. почвы эксперимента характеризовались низким уровнем содержания углеводов. Общий низкий уровень содержания углеводов в 2021 г. мог быть связан с высокой биологической активностью почвы после запашки сидеральной культуры (люпина) в 2020 г. Растительные остатки имеют разную скорость разложения в почве, скорость разложения зависит от их химического состава. Остатки с более высоким содержанием углеводов и аминокислот и меньшим содержанием фенольных кислот обладают большей скоростью минерализации углерода по сравнению с остатками с более низким содержанием углеводов и высоким – фенолов [33]. Кроме того, растительные остатки разделяют на быстро-, умеренно-, медленно- и слаборазлагаемые по мере расширения соотношения углерода к азоту [30]. С наибольшей скоростью разлагаются растительные остатки с узким соотношением C : N, к таковым относят остатки бобовых культур (C : N = 19–27), с меньшей – остатки зерновых: например, озимая пшеница имеет C : N = 52 [34].

По истечении 3-х лет эксперимента зафиксировано уменьшение содержания углеводов в почве СОК в 7 раз, в почве ВОК – в 4 раза по сравнению с началом эксперимента. Углеводы в почве не могут накапливаться в значительных количествах вследствие потребления их микроорганизмами и растениями.

Внесение биоугля в почву СОК позволило несколько уменьшить потери углеводов, в почве ВОК такого не произошло. Корреляционный анализ выявил увеличение накопления углеводов в почве с уменьшением ее влажности: $r = -0.2...-0.59$. При этом достоверную корреляционную связь отмечали в варианте СОК с биоуглем. Влияние температуры оказалось слабым и неоднозначным: $r = -0.004...0.05$, коэффициенты r были недостоверными. В начале эксперимента почва СОК содержала углеводов 11% от $C_{\text{орг}}$, почва ВОК – 7%. По окончании опыта в 2021 г. произошло значительное уменьшение данного показателя, в почве СОК до 1.55–1.73%, в почве ВОК – до 0.86–1.73%. Корреляционная зависимость между содержанием углеводов и $C_{\text{орг}}$ в период 2019–2020 гг. была высокой и достоверной ($p = 0.05$): $r = 0.70-0.92$,

за исключением варианта ВОК-контроль, где зависимость была слабее: $r = 0.20$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было показано, что по окончании эксперимента произошло увеличение содержания общего органического углерода: в контрольном варианте среднеокультуренной почвы — на 0.02%, в контроле высокоокультуренной почвы — на 0.09%. Внесение биоугля привело к увеличению данного показателя в почве СОК на 0.08, в почве ВОК — на 0.34%.

За 3 года эксперимента выявлена тенденция к накоплению лигнина во всех вариантах опыта. В вариантах СОК произошло увеличение содержания лигнина на 0.5–0.9 г/кг почвы, в вариантах ВОК — на 0.3–0.5 г/кг почвы, при этом наибольшее накопление было характерно для вариантов с биоуглем.

Также зафиксировано снижение содержания простых фенольных соединений с течением времени во всех вариантах опыта приблизительно в 2 раза. Можно отметить, что внесение биоугля не привело к какому-либо значительному изменению содержания липидоподобных соединений и углеводов ни в среднеокультуренной, ни в высокоокультуренной почве.

Двухфакторный дисперсионный анализ в полевом эксперименте 2019–2021 гг. не выявил преимущественного влияния на изменение содержания фенолов в дерново-подзолистой супесчаной почве внесения биоугля и степени ее окультуренности.

Преимущественное положительное влияние на накопление в почве лигнина в начале 3-летнего опыта оказала степень окультуренности почвы: $F_{\text{факт}} > F_{\text{крит}}$ ($2272.11 > 161.45$ при $p < 0.01$). По окончании эксперимента отмечено, что и степень окультуренности и внесение биоугля положительно влияли на содержание лигнина. Однако влияние степени окультуренности проявлялось сильнее ($F_{\text{факт}} > F_{\text{крит}}$, $3325.44 > 161.45$ при $p < 0.01$ для степени окультуренности и $1320.11 > 161.45$ при $p < 0.01$ для внесения биоугля). По окончании полевого эксперимента зафиксировано положительное влияние на изменение содержания липидоподобных соединений почвы дозы органических удобрений: $F_{\text{факт}} > F_{\text{крит}}$, $289 > 161.45$ при $p < 0.03$. Выявлено положительное влияние степени окультуренности почвы на содержание гидролизующих углеводов в 2020 г.: $F_{\text{факт}} > F_{\text{крит}}$, $1036.84 > 161.45$ при $p < 0.02$. В остальной период наблюдений такого влияния не выявлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химия древесины и ее основных компонентов. Барнаул, 2002. 50 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д., Цыбеков Ю.Б., Мильхеев Е.Ю., Егорова Р.А. Неспецифические органические вещества лесостепных и степных почв Забайкалья // *Усп. совр. естествозн.* 2019. № 12 (1). С. 181–185.
6. Bravo L. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance // *Nutr. Rev.* 1998. V. 56. № 11. P. 317–333.
7. Cates R.G., Rhoades D.F. Patterns in the production of anti-herbivore chemical defenses in plant communities // *Biochem. Systemat. Ecol.* 1977. V. 5. № 3. P. 185–193.
8. Елин Е.С. Фенольные соединения в биосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 392 с.
9. Muscolo A., Sidari M., Teixeira da Silva J.A. Biological effects of water-soluble soil phenol and soil humic extracts on plant systems // *Acta Physiol. Plantarum*. 2013. V. 35. P. 309–320.
10. Li Z.H., Wang Q., Ruan X., Pan C.D., Jiang D.A. Phenolics and plant allelopathy // *Molecules*. 2010. V. 15. P. 8933–8952.
11. Cesco S., Mimmo T., Tonon G., Tomasi N., Pinton R., Terzano R., Neumann G., Weisskopf L., Renella G., Landi L., Nannipieri P. Plant-borne flavonoids released into the rhizosphere: impact on soil bio-activities related to plant nutrition. A review // *Biol. Fertil. Soils*. 2012. V. 48. P. 123–149.
12. Квиткина А.К., Журавлева А.И., Дударева Д.М., Быховец С.С. Влияние соотношения углерода к азоту (C/N) на минерализацию и трансформацию лигнина: модельный подход // *Экол. урбанизир. территорий*. 2020. № 2. С. 30–40. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2020-12030>
13. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой биологии. М.: Наука, 2004. 348 с.
14. Bull I.D., Van Bergen P.F., Nott C.J., Poulton P.R., Evershed R.P. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted classical experiments-V. The fate of lipids in different long-term experiments // *Organic Geochem.* 2000. V. 31. P. 389–408.
15. Assis C.P., González-Vila F.J., Jucksch I., González-Pérez J.A., Neves J.C.L., Lani J.L., Mendonça E.S. Lipid abundance and composition of a humic Oxisol as a function of land use // *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. V. 68. № 2. P. 230–236.

16. Weisenberg G.L.B., Dorodnikov M., Kuzyakov Y. Source determination of lipids in bulk soil and soil density fractions after four years of wheat cropping // *Geoderma*. 2010. V. 156. P. 267–277.
17. Nehls U., Grunze N., Willmann M., Reich M., Kuster H. Sugar for my honey: carbohydrate partitioning in ectomycorrhizal symbiosis // *Phytochemistry*. 2007. V. 68. № 1. P. 82–91.
18. Kantar C., Cetin Z., Demiray H. In situ stabilization of chromium(VI) in polluted soils using organic ligands: the role of galacturonic, glucuronic and alginic acids // *J. Hazard. Mater.* 2008. V. 159. № 2–3. P. 287–293.
19. Merila P., Malmivaara-Lamsa M., Spetz P. Soil organic matter quality as a link between microbial community structure and vegetation composition along a successional gradient in a boreal forest // *Appl. Soil Ecol.* 2010. V. 46. № 2. P. 259–267.
20. 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 регистрации базы данных RU2013620682. Заявка №2013620301 от 22.03.2013.
21. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
22. Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. Химический анализ почв. Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. 264 с.
23. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ, 1981. 272 с.
24. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 253 с.
25. Zvereva E.L., Kozlov M.V. Consequences of simultaneous elevation of carbon dioxide and temperature for plant-herbivore interactions: a metaanalysis // *Global Change Biol.* 2006. V. 12. № 1. P. 27–41.
26. Yi W., Wetzstein H.Y. Biochemical, biological and histological evaluation of some culinary and medicinal herbs grown under greenhouse and field conditions // *J. Sci. Food Agric.* 2010. V. 90. № 6. P. 1063–1070.
27. Sinsabaugh R.L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil // *Soil Biol. Biochem.* 2010. V. 42. № 3. P. 391–404.
28. Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Вертебный В.Е., Хорак Я., Москвин М.А., Дубовицкая В.И., Хомяков Ю.В. Изменчивость полифенолоксидазной и пероксидазной активности агродерново-подзолистой почвы разной окультуренности с биоуглем // *Сел.-хоз. биол.* 2022. Т.57. №3. С. 476–485. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.3.476rus>
29. Waksman S.A., Gerretson F.C. The influence of temperature and moisture upon the nature and extent of the decomposition of plant residues by microorganisms // *Ecology*. 1931. V. 12. P. 33–60.
30. Семенов В.М., Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве // *Агрохимия*. 2006. № 7. С. 63–81.
31. Spaccini R., Mbagwub J.S.C., Igwe C.A., Conte P., Piccolo A. Carbohydrates and aggregation in lowland soils of Nigeria as influenced by organic inputs // *Soil Till. Res.* 2004. V. 75. P. 161–172.
32. Tian L., Dell E., Shi W. Chemical composition of dissolved organic matter in agroecosystems: correlations with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization // *Appl. Soil Ecol.* 2010. V. 46. № 3. P. 426–435.
33. Martens D.A., Loeffelmann K.L. Improved accounting of carbohydrate carbon from plants and soils // *Soil Biol. Biochem.* 2002. V. 34. P. 1393–1399.
34. Новиков А.А., Кисаров О.П. Обоснование роли корневых и пожнивно-корневых остатков в агроценозах // *Научн. журн. КубГАУ*. 2012. № 78 (04). С. 1–10.

Nonspecific Organic Compounds in Sandy Loam Spodosol with Biochar

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

^aAgrophysical Research Institute, Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg, 195220, Russia

^bRussian State Hydrometeorological University, Voronezhskaya ul. 79, St. Petersburg 192007, Russia

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

In a three-year small-scale experiment, the effect of the introduction of bio-coal on the content of individual organic compounds (low molecular weight phenols, lignin, lipid-like compounds, carbohydrates) in sod-podzolic sandy loam soil was studied. The experiment was started at the Agrophysical hospital MOS-AFI (Leningrad region). Sod-podzolic sandy loam soils differed in the degree of cultivation: medium-cultivated (MCS) and highly cultivated (HCS). The scheme of the experiment: control (without biochar) and soil with biochar at a dose of 20 t/ha. Determination of total organic carbon (C_{org}) was carried out by the Tyurin method, total nitrogen (N_{tot}) – by Kjeldahl. The determination of carbohydrates was carried out by the Dubois phenolic acid method, phenols – according to HDPE F 16.1: 2.3: 3.44–05, lignin – according to the method described in [1]. The introduction of bio-coal led to an increase in the content of lignin in the MCS soil by 0.08%, in the HCS soil – by 0.34%. During the 3 years of the experiment, a tendency to the accumulation of lignin was observed. In the MCS variants, there was an increase in the lignin content by 0.5–0.9 g/kg of soil, in the HCS variants – by 0.3–0.5 g/kg of soil, while the greatest accumulation was characteristic of the biochar variants. A decrease in the content of simple phenolic compounds over time was recorded in all variants of the experiment by about 2 times. It can be noted that the introduction of bio-coal did not lead to any significant change in the content of lipid-like compounds and carbohydrates in the MCS- and HCS soil.

Key words: biochar, soil, phenols, lignin, lipid-like compounds, carbohydrates.