

УДК 631.878:631.417:531.445.24

## ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА ДИСПЕРСНОЕ И МИНЕРАЛЬНО-СВЯЗАННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ

© 2025 г. Л. В. Бойцова<sup>1,\*</sup>, Е. Г. Зинчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт

195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

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

В четырехлетнем полевом эксперименте изучили влияние внесения биоугля в дозе 20 т/га на содержание общего органического углерода ( $C_{\text{опр}}$ ), углерода дисперсного пула, углерода минерально-связанного органического вещества и углерода илистых фракций почвы ( $C_{\text{ил}}$ ). Полевой эксперимент был заложен на Агрофизическом стационаре Меньковской опытной станции (Ленинградская обл.). Сельскохозяйственный участок занят дерново-подзолистой супесчаной почвой, которая различалась по степени окультуренности: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). На участках с разной окультуренностью заложены варианты: контроль (без биоугля) и с биоуглем в дозе 20 т/га. Содержание  $C_{\text{опр}}$  определяли по методу Тюрина. Выделение дисперсного пула (РОМ) и минерально-связанного (МАОМ) осуществляли по следующей методике. В пробу почвы массой 10 г, пропущенную через сито с ячейками 2 мм, добавляли 30 мл раствора гексаметаfosфата натрия ( $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ ) (5 г/л), затем взбалтывали на шейкере 15 ч (скорость 180 об. мин). Полученную суспензию пропускали через сито с диаметром ячеек 0.053 мм. На сите собирали фракцию РОМ, под ситом – фракцию МАОМ. Выделение илистых фракций почвы осуществляли методом седиментации после обработки проб ультразвуком. В результате 4-летнего эксперимента при внесении биоугля произошло увеличение содержания  $C_{\text{опр}}$  в среднеокультуренной почве на 2.8%, в высокоокультуренной почве – на 21.3%. Отмечено увеличение массы РОМ в варианте с биоуглем среднеокультуренной почвы на 8%, в высокоокультуренной почве с биоуглем, напротив, отмечено уменьшение содержания РОМ на 4% по сравнению с контролем. Биоуголь способствовал увеличению углеродистости дисперсного пула. Содержание углерода в дисперсном пуле почвы СОК увеличилось на 15%, почвы ВОК – на 20.8% по сравнению с контролем. Внесение биоугля привело к уменьшению массы пула МАОМ на 4-й год исследования в среднеокультуренной почве на 17.6% и увеличению его содержания в высокоокультуренной почве на 16.5%. Биоуголь способствовал уменьшению содержания углерода в МАОМ пуле в почве СОК на 20.8% и увеличению его содержания в почве ВОК на 25.5% по сравнению с контролем. Биоуголь способствовал увеличению содержания  $C_{\text{ил}}$  в пересчете на массу почвы в среднеокультуренной на 4.0%, в высокоокультуренной почве на 6.8%. На 4-й год эксперимента влияние биоугля ослабело.

**Ключевые слова:** общий органический углерод, углерод дисперсного пула, углерод минерально-связанного органического вещества, углерод илистых фракций, биоуголь, дерново-подзолистая почва.

**DOI:** 10.31857/S0002188125020015, **EDN:** VBWMQA

### ВВЕДЕНИЕ

Биоуголь представляет собой продукт карбонизации различной органической возобновляемой биомассы, в своем составе он содержит больше 10% углерода. Получают биоуголь путем высокотемпературного пиролиза, 500–800°C считается оптимальным диапазоном температуры при производстве биоугля [1]. Биоуголь (БУ) является высокомолекулярным органическим мелиорантом. Влияние

биоугля на содержание общего органического углерода ( $C_{\text{опр}}$ ), дисперсного органического вещества и минерально-связанного органического вещества изучено недостаточно. Дисперсное органическое вещество (Particulate Organic Matter, РОМ) представляет собой грубые органические частицы размером 2.0–0.053 мм, распределенные во фракции песка [2]. Минерально-связанное (Mineral-Associated Organic Matter, МАОМ) состоит из тонкодисперсных частиц размером <0.053 мм, связанных с минералами

пылеватой и илистой фракций. РОМ и МАОМ относят к структурным пулам углерода в почве.

Результаты 4-летнего эксперимента с бурой почвой показали [3], что по сравнению с исходной почвой общее содержание органического углерода в почве увеличилось на 8% при внесении биоугля в дозе 15 т/га. Было проведено несколько исследований по применению биоугля на почвах, которые дали противоречивые результаты. Например, некоторые авторы [4, 5] обнаружили, что биоуголь увеличивает содержание фракции твердых частиц органического углерода, не защищенной минералами (РОМ), но снижает содержание связанныго с минералами (защищенного) органического углерода (МАОМ). В работе [6], напротив, было показано увеличение содержания органического углерода, связанного с минералами, и содержания С<sub>орг</sub> со временем после применения биоугля в дозах 15 и 30 т/га, тогда как содержание органического углерода в твердых частицах РОМ уменьшалось. В опыте [7] через 9 лет после начала эксперимента почвы, в которые был внесен биоуголь, имели значительно большее содержание С<sub>орг</sub> по сравнению с контрольной почвой. В опыте в вегетационных сосудах при внесении биоугля из рисовой соломы в дозе 10, 20, 40 т/га в супесчаную и суглинистую почвы с последующим посевом пшеницы через год отмечено увеличение содержания органического углерода в супесчаной почве на 0.1–2.1 и в суглинке на 1.8–4.8 т/га [8]. Более высокое содержание общего органического углерода в почве после внесения БУ отдельно или в сочетании с минеральными удобрениями подтверждает положительную роль БУ в запасании углерода [9]. В 6-летнем полевом опыте на тяжелосуглинистой почве под рисом применение БУ в дозе 6 т/га/год увеличило содержание С<sub>орг</sub> в почве на 47.4–50.4% и органического углерода РОМ – на 63.7–74.6% [10].

Большинство исследований показало, что хранение углерода происходит преимущественно в незащищенных пулах углерода, таких как РОМ [11–13]. В работе [14] обнаружили, что применение биоугля увеличивало содержание МАОМ после 9-ти последовательных сезонов выращивания кукурузы. В работе [4] фракционирование почвы выявило значительное увеличение количества органических частиц РОМ в ответ на применение биоугля. В работе [15] показали, что применение БУ увеличило до 50% содержание почвенного органического вещества в мелких макроагрегатах (250–2000 мкм), а в частичках размером с ил и глину (<53 мкм) его содержание уменьшалось после добавления биоугля.

Длительное кумулятивное применение биоугля и других добавок оказалось положительное влияние на накопление С<sub>орг</sub> [7]. Биоуголь способствовал накоплению в основном углерода во фракции РОМ, однако через 9 лет он также увеличивал пул МАОМ,

особенно при применении в сочетании с другими добавками (например, компостом твердых бытовых отходов, осадком сточных вод [7]). При внесении биоугля в дозах 5, 15, 20 и 40 т/га в желтую почву при выращивании табака, после 2-х лет нахождения биоугля в почве наблюдали увеличение содержания С<sub>орг</sub> на 5.52, 13.8, 10.1 и 23.0% соответственно, содержание минерально-связанного органического углерода увеличилось на 6.80, 1.62, 4.35 и 39.8% соответственно, такая же тенденция зафиксирована и для желто-коричневой почвы [16]. В этом опыте также наблюдали увеличение содержания дисперсного органического углерода.

Цель работы – оценка влияния внесения биоугля на содержание общего органического углерода почвы, на содержание в ней дисперсного и минерально-связанного органического углерода.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой эксперимент проводили в течении 2019–2022 гг. на Агрофизическом стационаре АФИ (п. Меньково, Гатчинский р-н, Ленинградская обл.).

Почва стационара представлена дерново-подзолистой супесчаной почвой [17] разной степени оккультуренности: среднеокультуренная (СОК) и высокоокультуренная (ВОК). В 2003–2005 гг. в почву СОК внесено 220 т навоза КРС/га, в ВОК почву – 540 т/га.

В начале опыта в апреле 2019 г. почва участков характеризовалась следующими агрохимическими показателями [18]. СОК почва имела рН<sub>KCl</sub> 5.3 ед., содержание С<sub>орг</sub> – 1.53%, N<sub>общ</sub> – 0.17% [18], N-NO<sub>3</sub> – 16.4, N-NH<sub>4</sub> – 5.6 мг/кг почвы, подвижных (по Кирсанову) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 255, K<sub>2</sub>O – 112 мг/кг почвы. Характеристика ВОК почвы: рН<sub>KCl</sub> 6.4 ед., С<sub>орг</sub> – 2.92%, N<sub>общ</sub> – 0.28%, N-NO<sub>3</sub> – 22.3, N-NH<sub>4</sub> – 6.7 мг/кг почвы, подвижные (по Кирсанову) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 994, K<sub>2</sub>O – 542 мг/кг почвы [18].

В мае 2019 г. на участках СОК и ВОК почв были заложены опытные делянки размером 4 м<sup>2</sup>. Варианты опыта: 1 – контроль (без биоугля) (К), 2 – с биоуглем в дозе 20 т/га (Б).

Древесный уголь был приготовлен из березы при температуре 600°C, просеян через сито с диаметром ячейки 2 см. Биоуголь вносили в верхний слой 0–10 см почвы. В течение 2019 г. на делянках возделывали викоовсянную смесь (вика посевная яровая сорта Льговский (*Vicia sativa* L.) + овес яровой сорта Боррус (*Avena sativa* L.) в соотношении 30 : 70%) из расчета 200 кг/га, в 2020 г. – люпин белый сорт Дега (*Lupinus albus* L.) как сидерат под озимую пшеницу. В 2021 г. возделывали озимую пшеницу (*Triticum aestivum* L.) сорта Немчиновская 85, в 2022 г. – картофель (*Solanum tuberosum* L.).

Отбор почвенных образцов производили по стандартной методике [19] из слоя 0–10 см для

определения органического вещества 1 раз в конце сезона. Отбор проб осуществляли равномерно со всей площади участка. Пробы за 2021 г. не были проанализированы по объективным причинам.

Средняя температура воздуха периода 2019–2022 гг. (май–сентябрь) составила 14.2, 14.5, 15.7, 13.9°C соответственно, а количество выпавших осадков – 451, 517, 536, 413 мм.

Содержание  $C_{\text{опр}}$  определяли по методу Тюрина [20]. Выделение POM и MAOM осуществляли по методике [21]. В пробу почвы массой 10 г, пропущенную через сито с ячейками 2 мм, добавляли 30 мл раствора гексаметаfosфата натрия ( $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ ) (5 г/л), затем взбалтывали на шейкере 15 ч (скорость 180 об./мин). Кроме того, была выделена илистая фракция (<0.001 мм). Выделение илистой фракции почвы осуществляли по методике, подробно описанной в работе [23]. Анализы произведены в трехкратной повторности.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли при помощи пакета программы Microsoft Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных изменения содержания общего органического углерода в полевом опыте (рис. 1а) показал, что для всего периода наблюдений были характерны большие величины содержания  $C_{\text{опр}}$  в вариантах с биоуглем.

При этом внесение биоугля в почву ВОК достоверно ( $p < 0.05$ ) увеличило содержание  $C_{\text{опр}}$  по сравнению с вариантом СОК Б. По окончании эксперимента (сентябрь 2022 г.) произошло увеличение содержания  $C_{\text{опр}}$  в среднеокультуренной почве в обоих вариантах, в варианте К – до 25.3 г C/kg почвы и до 25.9 г C/kg почвы в варианте Б. В высокоокультуренной почве, напротив, зафиксировано уменьшение содержания  $C_{\text{опр}}$  по сравнению с началом опыта. Можно предположить усиление минерализации органического вещества вследствие изначально более высокой биологической активности почвы высокой окультуренности. Вероятно, происходило усиление минерализации в первую очередь легкой фракции органического вещества, причем в варианте с биоуглем наблюдали большую потерю углерода, чем в контроле.

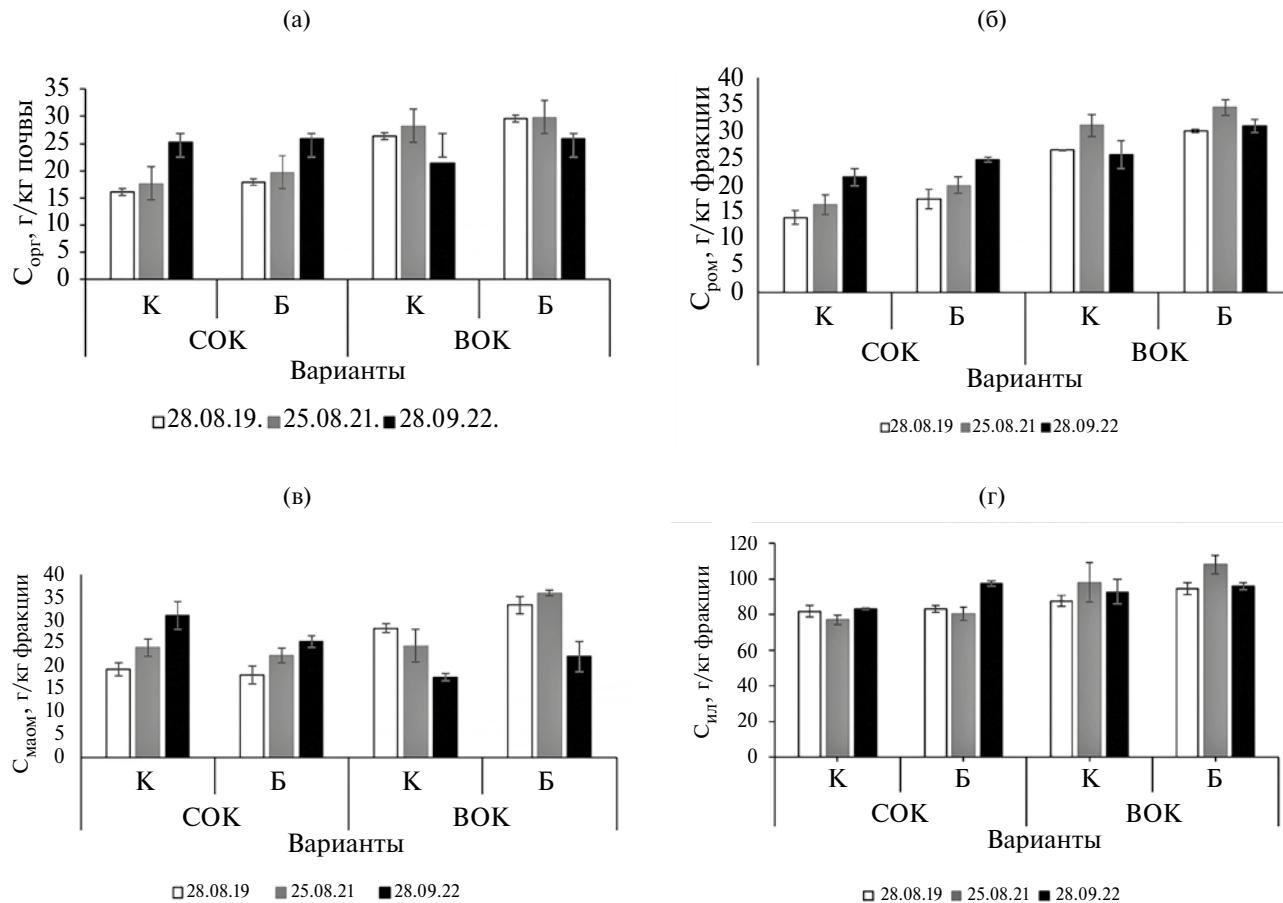


Рис. 1. Содержание: общего органического углерода ( $C_{\text{опр}}$ ) – (а), углерода дисперсного органического вещества ( $C_{\text{ром}}$ ) – (б), углерода минерально-связанного органического вещества ( $C_{\text{маом}}$ ) – (в), углерода илистой фракции ( $C_{\text{ил}}$ ) – (г) в дерново-подзолистой супесчаной почве; варианты: с биоуглем – Б и без биоугля, контроль – К.

Биоуголь способствовал усилению минерализации легко доступного органического вещества. Известно, что биоуголь может увеличить численность и активность микробов за счет изменения среды их обитания и снабжения их углеродом и питательными веществами [24], что в описываемом опыте усиливало биологическую активность почвы и приводило к большим потерям органического вещества нативной почвы.

Определение структурных пулов и содержания в них органического углерода выявило увеличение содержания углерода дисперсного органического вещества во всех вариантах по окончании опыта (рис. 1б).

При этом за весь период наблюдений величины  $C_{\text{ром}}$  в варианте с биоуглем превышали контроль. Биоуголь способствовал увеличению содержания углерода фракции РОМ, что согласовалось с данными других авторов [7, 25]. Наибольшее положительное влияние на углерод дисперсного органического вещества биоугольоказал на 3-й год после внесения его в почву. В пробах 2021 г. зафиксированы максимальные показатели содержания  $C_{\text{ром}}$ , которые составили в почве СОК 20.0, в почве ВОК 34.5 г С/кг фракции. По истечении 4-х лет после внесения биоугля наблюдали уменьшение его положительного влияния на содержание  $C_{\text{ром}}$  в почве ВОК и сохранение этого влияния в почве СОК. За период наблюдений величины  $C_{\text{ром}}$  в почве ВОК с биоуглем достоверно превосходили ( $p < 0.007$ ) таковые для почвы СОК с биоуглем. Углерод фракции РОМ составлял 42–43% от  $C_{\text{опр}}$  в варианте СОК К и ≈49% в варианте с внесением биоугля. В почве ВОК в обоих вариантах доля  $C_{\text{ром}}$  от  $C_{\text{опр}}$  составляла в начале наблюдений 54–55%, по их окончании – ≈65%.

Изменение содержания углерода в минерально-связанной фракции выглядело следующим образом (рис. 1в).

По окончании 3-го года опыта (2021 г.) наблюдали увеличение содержания  $C_{\text{маом}}$  во всех вариантах. По истечении 4-го года исследования (2022 г.) отмечено уменьшение содержания  $C_{\text{маом}}$  в почве ВОК и незначительное увеличение в почве СОК относительно 2021 г. в обоих вариантах. В течение эксперимента в почве средней степени окультуренности наблюдали уменьшение содержания  $C_{\text{маом}}$  при внесении биоугля по сравнению с контролем. Напротив, внесение биоугля в почву высокой степени окультуренности привело к увеличению содержания  $C_{\text{маом}}$ . Вероятно, это связано с тем, что биоуголь усиливал органо-минеральное взаимодействие и, таким образом, усиливал удержание лабильных органических веществ в МАОМ [26, 27], а почва ВОК обладала изначально большим количеством органического вещества, и лабильного в том числе [28]. Различия показателей средних  $C_{\text{маом}}$  между ВОК и СОК при внесении биоугля не являлись достоверными ( $p < 0.38$ ).

За период эксперимента содержание углерода фракции МАОМ составляло 54–55% от  $C_{\text{опр}}$  в почве СОК К и 44–48.5% – в варианте с внесением биоугля. В почве ВОК К доля  $C_{\text{ром}}$  от  $C_{\text{опр}}$  составляла 32–40%, при внесении биоугля в данную почву доля  $C_{\text{маом}}$  в общем органическом углероде повысилась и составляла 33–46.5%.

Проведенное исследование показало накопление углерода в илистой фракции в пробах 2022 г. по сравнению с пробами, отобранными в 2019 г. (рис. 1г).

Величины содержания  $C_{\text{ил}}$  варианта Б варьировали в почве СОК от 80.7 до 97.5 г С/кг фракции, в почве ВОК – от 94.7 до 108 г С/кг фракции. Содержание  $C_{\text{ил}}$  в контрольных вариантах изменялось в следующем диапазоне: для почвы СОК – от 77.2 до 83.6 г С/кг фракции, в почве ВОК – от 87.8 до 98.2 г С/кг фракции. Варианты Б обнаружили большее количество  $C_{\text{ил}}$  по сравнению с вариантами К за весь период наблюдений. Вероятно, данный факт связан со строением биоугля. Биоуголь может хранить нативное органическое вещество почвы внутри своей пористой сети, ограничивая доступ микробов, разлагающих органическое вещество [29–31].

На 3-й год после внесения биоугля произошло увеличение содержания  $C_{\text{ил}}$  в почве СОК на 4.4%, в почве ВОК на 10.2% по сравнению с контролем. По истечении 4-го года эксперимента отмечена прибавка содержания  $C_{\text{ил}}$  в почве СОК на 4.7, в почве ВОК на 3.5%.

За период эксперимента доля углерода илистой фракции от  $C_{\text{маом}}$  варьировала в почве СОК К в диапазоне 6.7–8.9%, в варианте с внесением биоугля – в диапазоне 7.3–11.3%. В варианте ВОК К доля  $C_{\text{ил}}$  от  $C_{\text{маом}}$  составила 12.4–15.0%, при внесении биоугля величина данного показателя снизилась и составляла 10.3–12.4%. При этом доля  $C_{\text{ил}}$  от  $C_{\text{маом}}$  в варианте ВОК Б превосходила данный показатель в варианте СОК Б.

Корреляционный анализ установил сильную связь между содержанием  $C_{\text{опр}}$  и изученными параметрами. Практически во всех вариантах коэффициент корреляции составлял 0.96–0.99, лишь в варианте ВОК с биоуглем связь между содержанием  $C_{\text{опр}}$  и  $C_{\text{ром}}$  носила средний характер ( $r = 0.36$ ).

Двухфакторный дисперсионный анализ выявил влияние степени окультуренности на содержание  $C_{\text{опр}}$  в эксперименте ( $F_{\text{фак}} > F_{\text{крит}}$ , 1293.16 > 161.45 при  $p < 0.017$  – 3-й год). Также выявлено влияние данных факторов на содержание  $C_{\text{ром}}$  в 1-й и 3-й год опыта, при этом большее влияние оказала степень окультуренности ( $F_{\text{фак}} > F_{\text{крит}}$ , 158 513.27 > 161.45 при  $p < 0.001$  для степени окультуренности и  $F_{\text{фак}} > F_{\text{крит}}$ , 7440.83 > 161.45 при  $p < 0.007$  для биоугля – 3-й год). Влияние факторов на содержание  $C_{\text{маом}}$  не выявлено в течение эксперимента. На 4-й год эксперимента не выявлено влияния факторов

на содержание  $C_{\text{опр}}$ ,  $C_{\text{ром}}$ . На содержание  $C_{\text{ил}}$  в первый год влияли оба рассмотренных фактора, в последующие годы – только степень окультуренности ( $F_{\text{фак}} > F_{\text{крит}}$ ,  $1437.661.08 > 161.45$  при  $p < 0.001$  для степени окультуренности и  $F_{\text{фак}} > F_{\text{крит}}$ ,  $4788.04 > 161.45$  при  $p < 0.009$  для биоугля – 1-й год).

## ВЫВОДЫ

В результате 4-летнего эксперимента при внесении биоугля произошло увеличение содержания общего органического углерода в среднеокультуренной почве на 2.8, в высокоокультуренной почве на 21.3%. Наблюдали увеличение массы дисперсного пула органического вещества в варианте с биоуглем среднеокультуренной почвы на 8%, в высокоокультуренной почве с биоуглем, напротив, отмечено уменьшение содержания РОМ на 4% по сравнению с контролем. Однако биоуголь способствовал увеличению углеродистости дисперсного пула. Содержание углерода в дисперсном пуле почвы СОК увеличилось на 15.0, почвы ВОК – на 20.8% по сравнению с контролем.

Внесение биоугля привело к уменьшению массы фракции МАОМ на 4-й год исследования в среднеокультуренной почве на 17.6% и увеличению ее содержания в высокоокультуренной почве на 16.5%. Биоуголь способствовал уменьшению содержания углерода в данном пуле в среднеокультуренной почве на 20.8% и увеличению его содержания в высокоокультуренной почве на 25.5% по сравнению с контрольным вариантом.

Внесение биоугля способствовало увеличению доли углерода илистой фракции в составе минерально-связанного органического вещества в среднеокультуренной почве. В высокоокультуренной почве, напротив, внесение биоугля привело к уменьшению  $C_{\text{ил}}$  в составе  $C_{\text{маом}}$ . Однако на 4-й год эксперимента биоуголь способствовал увеличению содержания углерода илистой фракции в пересчете на массу почвы в среднеокультуренной на 4, в высокоокультуренной почве – на 6.8%. На 4-й год эксперимента влияние биоугля ослабело.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chatterjee R., Sajjadi B., Chen W.-Y., Mattern D.L., Hammer N., Raman V., Dorris A.* Effect of pyrolysis temperature on physics-chemical properties and acoustic-based amination of biochar for efficient  $\text{CO}_2$  adsorption // *Front. Energy Res.* 2020. V. 8. Art. 85. DOI: 10.3389/fenrg.2020.00085
- Lavallee J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F.* Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // *Global Change Biol.* 2020. V. 26 (1). P. 261–273. DOI: 10.1111/gcb.14859
- Meng Yu. G., Tong J., Xiao Ri H., Jin Feng Y.* Effects of applying biochar-based fertilizer and biochar on organic carbon fractions and contents of brown soil // *J. Sci. Agricult. Sinica.* 2018. V. 51. Iss. 11. P. 2126–2135. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.11.010
- Coopera J., Greenbergb I., Ludwig B., Hippichb L., Fischerc D., Glaserc B., Kaisera M.* Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions // *Agri-Ecosyst. Environ.* 2020. V. 295. 106882. DOI: 10.1016/j.agee.2020.106882
- Shi S., Zhang Q., Lou Y., Du Z., Wang Q., Hu N., Wang Y., Gunina A., Song J.* Soil organic and inorganic carbon sequestration by consecutive biochar application: results from a decade field experiment // *Soil Use Manag.* 2021. V. 37. P. 95–103.
- Zhang R., Qu Z., Liu L., Yang W., Wang L., Li J., Zhang D.* Soil respiration and organic carbon response to biochar and their influencing factors // *Atmosphere.* 2022. V. 13. 2038. DOI: 10.3390/atmos13122038
- Giannetta B., Plaza C., Galluzzi G., Benavente-Ferraces I., García-Gil J.C., Panettieri M., Gasco' G., Zaccione C.* Distribution of soil organic carbon between particulate and mineral-associated fractions as affected by biochar and its co-application with other amendments // *Agri-Ecosyst. Environ.* 2024. V. 360. 108777. DOI: 10.1016/j.agee.2023.108777
- Mavi M.S., Singh G., Singh B.P., Sekhon B.S., Choudhary O.P., Sagi S., Berry R.* Interactive effects of rice-residue biochar and N-fertilizer on soil functions and crop biomass in contrasting soils // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2018. V. 18. № 1. P. 41–59. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005000201>
- Demisie W., Liu Z., Zhang M.* Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil // *Catena.* 2014. V. 121. P. 214–221.
- Tian J., Wanga J., Dippold M., Gao Y., Blagodatskaya E., Kuzyakov Ya.* Biochar affects soil organic matter cycling and microbial functions but does not alter microbial community structure in a paddy soil // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 556. P. 89–97. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.010
- Fernández-Ugalde O., Gartzia-Bengoetxea N., Arostegui J., Moragues L., Arias-González A.* Storage and stability of biochar-derived carbon and total organic carbon in relation to minerals in an acid forest soil of the Spanish Atlantic area // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 587–588. P. 204–213. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.121
- Cotrufo M.F., Ranalli M.G., Haddix M.L., Six J., Lugato E.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter // *Nat. Geosci.* 2019. V. 12. P. 989–994. DOI: 10.1038/s41561-019-0484-6

13. *Kalu S., Seppänen A., Mganga K.Z., Sietiö O.-M., Glaser B., Karhu K.* Biochar reduced the mineralization of native and added soil organic carbon: evidence of negative priming and enhanced microbial carbon use efficiency // *Biochar*. 2024. V. 6. Art. 7. DOI: 10.1007/s42773-023-00294-y
14. *Sun Q., Yang X., Bao Z., Gao J., Meng J., Han X., Lan Y., Liu Z., Chen W.* Responses of microbial necromass carbon and microbial community structure to straw- and straw-derived biochar in brown earth soil of Northeast China // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. Art. 967746. DOI: 10.3389/fmicb.2022.967746
15. *Qianjin C., Min L., Zhongsheng Z.* Effects of biochar application on soil organic carbon in degraded saline-sodic wetlands of Songnen Plain, Northeast China // *Chin. Geograph. Sci.* 2021. V. 31(5). P. 877–887. DOI: 10.1007/s11769-021-1232-6
16. *Jiang M., Li C., Gao W., Cai K., Tang Y., Cheng J.* Comparison of long-term effects of biochar application on soil organic carbon and its fractions in two ecological sites in karst regions // *Geoderma Region*. 2022. V. 28. e00477. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00477 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235200942100122X>
17. *Мусеев К.Г., Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Зинчук Е.Г., Гончаров В.Д.* Корректировочные работы по крупномасштабному почвенному картографированию Меныховского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии // Агрофизика. 2013. № 1. С. 30–36.
18. *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.
19. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 419 с.
20. *Расторопова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Кацаткина Г.А., Федорова Н.Н.* Химический анализ почв. СПб.: СПбГУ, 1995.
21. *Cambardella C.A., Elliott E.T.* Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1992. V. 56. № 3. P. 777–783. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x
22. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Герено В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н.* Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окруж. среда. 2023. Т. 6(1). e199. DOI: 10.31251/pos.v6i1.199
23. *Бойцова Л.В., Непримерова С.В., Зинчук Е.Г.* Влияние минералогического состава почв на стабилизацию в них органического углерода // Агрофизика. 2019. № 4. С. 1–8. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.04.01
24. *Pokharel P., Ma Z., Chang S.X.* Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis // *Biochar*. 2020. V. 2. P. 65–79. DOI: 10.1007/s42773-020-00039-1
25. *Chen H.X., Du Z.L., Guo W., Zhang Q.Z.* Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain // *Chinese*. 2011. V. 22(11). 2930–4. PMID: 22303671 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22303671/>
26. *Akpinar D., Tian J., Shepherd E., Imhoff P.T.* Impact of wood-derived biochar on the hydrologic performance of bioretention media: effects on aggregation, root growth, and water retention // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 339. 117864. DOI: 10.1016/j.jenvm.an.2023.117864
27. *Weng Z., Van Zwieten L., Singh B.P., Tavakkoli E., Joseph S., Macdonald L.M., Rose T.J., Rose M.T., Kimber S.W.L., Morris S., Cozzolino D., Araujo J.R., Archanjo B.S., Cowie A.* Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits // *Nat. Clim. Change*. 2017. V. 7. P. 371–376. DOI: 10.1038/nclimate3276
28. *Бойцова Л.В.* Органическое вещество и его легкая фракция в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы // Агрофизика. 2015. № 3. С. 1–8.
29. *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. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.02.005
30. *Yu Z., Ling L., Singh B.P., Luo Y., Xu J.* Gain in carbon: deciphering the abiotic and biotic mechanisms of biochar-induced negative priming effects in contrasting soils // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 746. 141057. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141057
31. *Bernard L., Basile-Doelsch I., Derrien D., Fanin N., Fontaine S., Guenet B., Karimi B., Marsden C., Maron P.-A.* Advancing the mechanistic understanding of the priming effect on soil organic matter mineralization // *Funct. Ecol.* 2022. V. 36. P. 1355–1377. DOI: 10.1111/1365-2435.14038

## Influence of Biochar on Disperse and Mineral-Associated Organic Matter in Sod-Podzolic Sandy Loamy Soil

L. V. Boitsova<sup>a, #</sup>, E. G. Zinchuk<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Agrophysical Research Institute,  
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia  
#E-mail: larisa30.05@mail.ru*

In a four-year field experiment, the effect of applying biochar at a dose of 20 t/ha on the content of total organic carbon (TOC), dispersed pool carbon, carbon of mineral-associated organic matter and carbon of the clay fraction of the soil ( $C_{clay}$ ) was studied. The field experiment was carried out at the Agrophysical Station of the Menkovo Experimental Station (Leningrad Region). The agricultural plot is occupied by sod-podzolic sandy loamy soil, which differed in the degree of cultivation: medium cultivated (MC) and highly cultivated (HC). Experiment scheme: control (without biochar) and soil with biochar at a dose of 20 t/ha. The content of  $C_{org}$  was determined using the Tyurin method. Isolation of the dispersed pool (POM) and mineral-associated pool (MAOM) was carried out according to the following procedure. 30 ml of sodium hexametaphosphate solution ( $Na_6P_6O_{18}$ ) (5 g/l) was added to a soil sample weighing 10 g, passed through a sieve with 2 mm mesh, then shaken on a shaker for 15 hours (speed 180 rpm). The resulting suspension was passed through a sieve with a hole diameter of 0.053 mm. The POM fraction was collected on a sieve, and the MAOM fraction was collected under the sieve. Isolation of the clay fraction of the soil was carried out by sedimentation after treating the samples with ultrasound. As a result of a 4-year experiment, when biochar was added, there was an increase in  $C_{org}$  content in medium cultivated soil by 2.8%, in highly cultivated soil by 21.3%. An increase in the mass of POM in the variant with biochar of medium cultivated soil by 8% was observed; in highly cultivated soil with biochar, on the contrary, a decrease in the POM content by 4% was observed, compared to the control. Biochar contributed to increasing the carbon content of the dispersed pool. The carbon content in the dispersed pool of MC soil increased by 15%, and of HC soil by 20.8%, compared to the control. The addition of biochar led to a decrease in the mass of the MAOM pool in the 4th year of the study in medium cultivated soil by 17.6%, and an increase in its content in highly cultivated soil by 16.5%. Biochar contributed to a decrease in the carbon content in the MAOM pool in MC soil by 20.8%, and an increase in its content in HC soil by 25.5%, compared to the control option. Biochar contributed to an increase in the content  $C_{clay}$  in terms of soil weight in medium cultivated soil by 4%, in highly cultivated soil by 6.8%. In the fourth year of the experiment, the effect of biochar weakened.

**Keywords:** total organic carbon, dispersed pool carbon, mineral-associated organic matter carbon, clay fraction carbon, biochar, sod-podzolic soil.