

- Zinchenko M. K., Zinchenko S. I., Borin A. A., Kamneva O. P. Fermentativnaya aktivnost' agrarnykh pochv Verkhnevolzh'ya [Fermentation activity of farmland soils in Upper Volga Region] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2017, no. 3, pp. 34–37.
- Ivanov D. A. *Landshaftno-adaptivnyye sistemy zemledeliya* (agroekologicheskiye aspekty) [Landscape-adaptive farming systems (agroecological aspects)], Tver, 2001, 304 p.
- Karpachevskii L. O. (red.). *Sel'skokhozyaistvennyye ekosistemy* [Agricultural ecosystems] / Per. s angl. A. S. Kamenskogo, Yu. A. Smirnova, E. E. Khavkina. Moscow: Agropromizdat, 1987, pp. 8–10.
- Lukin S. M. *Agroekologicheskoye obosnovaniye sistem primeneniya udobrenii v sevooborotakh na dernovo-podzolistykh supeschanykh i peschanykh pochvakh*. Avtoref. diss. d-ra biol. nauk [Agricultural and ecological practices of applying fertilizers on sod-podzolic sandy loam and sandy soil within crop rotation. Abst. diss. Doc. boil. Sci.], Moscow, 2009, 49 p.
- Shein E. V. *Kurs fiziki pochv*. Uchebnik [Soil physics. Textbook], Moscow: Publishing house Moscow State University, 2005, 62 p.

УДК 631.42

DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.04

ЛАБИЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ УГЛЕРОДА И АЗОТА, ЭКСТРАГИРУЕМЫЕ ГОРЯЧЕЙ ВОДОЙ, В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ С БИОУГЛЕМ И РАСТИТЕЛЬНЫМИ ОСТАТКАМИ

В. А. Милосердова¹, Е. Я. Рижия², Н. Е. Орлова¹, Т. А. Банкина¹

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

199034, Санкт-Петербург, 16-я линия В.О., д. 29;

²ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

E-mail: bankinaagro@mail.ru

Поступила в редакцию 19 августа 2019 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

В связи с существующими неопределенностями относительно рационального использования биоугля как мелиоранта сельскохозяйственных почв проведен вегетационный лабораторный эксперимент, в котором изучено воздействие древесного биоугля из карельской березы, внесенного в дерново-подзолистую супесчаную почву совместно с растительными остатками, на изменение некоторых форм лабильных соединений углерода и азота. Схема эксперимента включала 6 вариантов: (1) почва с биоуглем; (2) почва с растительными остатками клевера; (3) почва с растительными остатками тимофеевки; (4) совместное внесение биоугля и растительных остатков клевера; (5) совместное внесение биоугля и растительных остатков тимофеевки; (6) контроль – без биоугля и растительных остатков. При совместном внесении биоугля с растительными остатками клевера и тимофеевки их дозы составляли 15 т га⁻¹ и 20 т га⁻¹ сырой биомассы соответственно. Исследования содержания аммонийного, нитратного и общего азота в почве проведены при помощи общепринятых методов, а экстракция лабильного углерода (C_{эГВ}) и азота (N_{эГВ}) – по методу Шульц-Кершенца (горячей водой). Установлено, что внесение биоугля не оказало достоверного влияния на содержание C_{эГВ} в почве, но вызвало достоверное снижение (на 13%) количества N_{эГВ} к концу эксперимента. Внесение растительных остатков клевера и тимофеевки привело к усилению процессов минерализации органического вещества в почве, что сопровождалось увеличением содержания в ней водорастворимого лабильного углерода и снижением количества водорастворимого органического азота. При внесении в почву растительных остатков клевера и тимофеевки усилилось поступление азота в растения кукурузы, что привело к увеличению их биомассы. Внесение биоугля в сочетании с растительными остатками (особенно клевера) способствовало снижению эффективности воздействия последних на интенсивность минерализационных процессов в почве, азотное питание и формирование биомассы растений кукурузы.

Растительные остатки бобовых культур целесообразно вносить в почву в сочетании с биоуглем для снижения интенсивности их минерализации и обеспечения пролонгированного поступления азота в растения.

Ключевые слова: биоуголь, растительные остатки, клевер, тимофеевка, водорастворимый углерод, водорастворимый азот, азотное питание, кукуруза.

INFLUENCE OF BIOCHAR AND VEGETABLE RESIDUES ON THE CONTENT OF HOT-WATER EXTRACTABLE CARBON AND NITROGEN COMPOUNDS IN SOD-PODZOLIC SOIL

V. A. Miloserdova¹, E. Y. Rizhiya², N. E. Orlova¹, T. A. Bankina¹

¹ Saint-Petersburg State University, 16th line of V.I., 29, St. Petersburg, 199034

² Agrophysical Research Institute, Grazhdanskiy pr., 14, St. Petersburg, 195220

E-mail: bankinaagro@mail.ru

Biochar is not a uniform substance, especially when considering its effect on the hot-water extractable carbon (HWC) and nitrogen (HWN) contents, as well as on the content of available soil nitrogen. The high variability among biochars used as soil amendments has led to conflicting reports on the effects of biochar on different soil processes. The effect of biochar on the content and composition of HWC and HWN in soils has received little research attention. A laboratory experiment was conducted to study the effect of wood biochar with different crop residues on the change of HWC and HWN compounds and available nitrogen in sod-podzolic sandy loam soil. In the experiment, wood biochar from Karelian birch was used in combination with plant residues of clover and timothy. The experimental design included 6 treatments: (1) soil with biochar, (2) soil with clover plant residues, (3) soil with timothy plant residues, (4) soil with biochar and clover plant residues, (5) soil with biochar and timothy plant residues, in comparison with (6) control (without biochar or plant residues). Ammonium nitrogen, nitrates, and total nitrogen content in the soil were measured by conventional methods. The extraction of HWC and HWN was carried out by the Schulz-Kershens method. It was established that biochar application to the sod-podzolic sandy loam soil inhibited mineralization of organic soil compounds, which was accompanied by an increase in the content of HWC (by 10.9%) and HWN (by 13%) in the soil. The use of biochar stimulated the corn biomass formation, but did not significantly affect nitrogen intake of the plants. Biochar in combination with plant residues (especially clover) reduced the effect of the latter on the intensity of mineralization processes in the soil, nitrogen nutrition and the corn biomass formation.

Key words: biochar, plant residues, clover, timothy, water-soluble carbon and nitrogen, nitrogen nutrition, corn.

ВВЕДЕНИЕ

В сельском хозяйстве давно известны полезные свойства древесного угля: в измельчённом виде он вводился в рацион птиц и животных, а также добавлялся в почву при посадке различных корнеплодов как эффективное натуральное природное средство против разнообразных болезней сельскохозяйственных культур (Юдкевич, 2002). Современные исследования биоугля из древесины показали, что он способен удерживать в почве влагу (Sun, Lu, 2014), элементы питания, необходимые для роста растений, а также положительно влиять на продуктивность различных культур (Asai et al., 2009; Kerre et al., 2017; Yao et al., 2012) и снижать эмиссию парниковых газов (Рижия и др., 2018). Тем не менее потенциал применения биоугля в сельскохозяйственной практике к настоящему времени изучен не до конца. Необходимы дополнительные исследования механизмов взаимодействия данного продукта с почвами. При использовании биоугля важно учитывать факт существования отрицательного баланса гумуса и питательных веществ в пахотных почвах Нечерноземной зоны (Безуглова, Орлов, 2000). Несмотря на высокое содержание общего углерода (максимально до 90–95%), биоуголь устойчив к минерализации, т. к. сложен высококонденсированными ароматическими структурами, малодоступными для почвенных организмов и растений (Nguyen et al., 2008; Novak et al., 2010). Необходимо иметь в виду, что биоуголь – это не удобрение, а мелиорант, и восполнение элементов питания, необходимых для роста и развития растений,

должно осуществляться посредством дополнительного внесения органических и минеральных удобрений, а также растительных остатков.

Определяющим фактором почвенного плодородия и развития растений, влияющим на продуктивность и экологическую устойчивость почв, является лабильное органическое вещество (ЛОВ) (Perdue, Ritchie, 2003). Оно представляет собой материальную основу существования почвенной биоты, а также является основным резервуаром почвенного доступного азота, от содержания которого зависит величина и качество будущего урожая (Кершенс, 1992). Основными формами органических веществ, участвующих в образовании ЛОВ, являются пожнивные остатки, детрит и гумус, а конечными продуктами минерализации ЛОВ – минеральные формы азота (NH_4^+ и NO_3^-) и CO_2 . Литературные источники свидетельствуют, что содержание ЛОВ в различных биоуглях является крайне низким и зависит от вида биомассы и конечной температуры пиролиза. В березовом биоугле величина ЛОВ может достигать 0,008–0,01% (Mukherjee, Zimmerman, 2013). Научный интерес вызывает исследование совместного применения биоугля и растительных остатков как дополнительных источников азота, при котором последние могут служить основой для образования лабильных органических веществ, а биоуголь – стабилизатором указанных веществ в почве.

Цель данного исследования заключалась в изучении влияния биоугля, внесенного в дерново-подзолистую супесчаную почву совместно с растительными остатками, на содержание лабильного углерода и доступного растениям почвенного азота.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в лабораторных условиях на дерново-подзолистой супесчаной почве, отобранной на территории Меньковского филиала ФГБНУ АФИ (Ленинградская обл., пос. Меньково). Исходная почва характеризовалась слабокислой реакцией среды ($pH_{(КСЛ)}$ 5,3), средним содержанием общего углерода и азота (1,52 и 0,11% соответственно), минерального азота и калия (20,5 и 75,3 мг $кг^{-1}$ соответственно) и высоким содержанием фосфора (485 мг $кг^{-1}$).

Биоуголь, полученный пиролизом березовой древесины при температуре 550°C, отличался высоким содержанием общего углерода (87%), низким

содержанием общего азота (0,4%) и отсутствием минерального азота в аммонийной и нитратной форме. Также биоуголь характеризовался низким содержанием таких питательных элементов, как фосфор (8,3 мг $кг^{-1}$) и калий (73 мг $кг^{-1}$), но высоким содержанием кальция и магния (1071 и 516 мг $кг^{-1}$ соответственно), чем объясняется его щелочная реакция ($pH_{водн}$ 8,5). Берёзы Карельского перешейка относятся к так называемым «железным ландшафтам», поэтому в произведенном из них биоугле содержалось повышенное количество железа (789 мг $кг^{-1}$).

Элементный состав растительных остатков клевера красного (*Trifolium pratense*) и тимофеевки (*Phleum pratense*), используемых в эксперименте, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав растительных остатков, используемых в эксперименте

Растение	C:N	C	N	% на сухую массу				
				Зола	K ₂ O	CaO	MgO	P ₂ O ₅
Клевер красный	20	39,4	1,9	5,4	1,5	2,0	0,6	0,6
Тимофеевка	27	41,9	1,5	5,9	2,0	0,5	0,2	0,7

Опыт проводился в вегетационных сосудах объемом 1 литр в 5-кратной повторности. В каждый сосуд добавлялось по 0,5 кг сухой почвы, просеянной через сито 2 мм и увлажненной до влажности структурообразования (21% от веса почвы), которая поддерживалась на постоянном уровне в течение всего эксперимента. Биоуголь фракцией менее 2 мм вносился в каждый сосуд и тщательно перемешивался с почвой. Доза мелиоранта вносилась из расчёта 15 т $га^{-1}$, а растительных остатков – 20 т $га^{-1}$ сырой биомассы на сосуд. Компостирование почвы с биоуглем и растительными остатками проводилось в течение 90 дней. По истечении указанного срока в каждый сосуд высевались семена кукурузы зубовидной жёлтой (*Zea mays* L., сорт Yellow, США) в количестве 3-х штук на сосуд. Через 45 дней после посева (до фазы выбрасывания метелок) был проведен учет биомассы и общего содержания азота в растениях кукурузы.

Содержание минерального азота в аммонийной и нитратной форме, а также общего азота определялось общепринятыми методами, применяемыми в агрохимии (Крейер и др., 2005). Определение нитрификационной (нитрифицирующей) способности почв (НСП) проводилось по методу Кравкова. Данный метод основан на определении нитратов, накапливающихся в почве в результате разложения азотсодержащих органических соединений при её компостировании с соблюдением режима аэрации и оптимальных условий температуры и влажности (Методические указания, 1984). Экстракция лабильного углерода ($C_{эТВ}$) и азота ($N_{эТВ}$) проведена горячей водой по методу Шульц-Кершенца (1998). Данная фракция содержит значительную часть углерода микробной биомассы и простые органические компоненты.

Математическая обработка проведена в программе IBM SPSS Statistics, 25.0.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В лабораторном опыте определялись динамика содержания минерального азота в аммонийной и нитратной форме и нитрифицирующая способность почвы (НСП). В табл. 2 представлены данные по указанным характеристикам после 3 и 90 суток инкубирования.

Результаты эксперимента показали, что максимальное содержание аммонийного азота ($N-NH_4^+$) в почве было достигнуто на 3-й день компостирования во всех вариантах опыта. Так, в вариантах с внесением клевера и тимофеевки данный показатель составил 37 и 23 мг $N-NH_4^+$ $кг^{-1}$ почвы, что соответственно в 3,8 и 2,5 раза выше по сравнению с контролем. Биоуголь, внесенный в почву без растительных остатков, не оказал существенного влияния на содержание $N-NH_4^+$ в почве. Совместное внесение биоугля с растительными остатками клевера способствовало увеличению концентрации $N-NH_4^+$ в почве в среднем в пять раз, а совместное внесение с растительными остатками тимофеевки – в три раза по сравнению с внесением только биоугля. К концу инкубационного эксперимента было установлено, что внесение биоугля привело к снижению содержания $N-NH_4^+$ в почве в 3,5 раза по сравнению с контролем, что связано с повышением отношения C/N в почве, эффектом сорбции $N-NH_4^+$ биоуглем, частичной иммобилизацией азота почвенными микроорганизмами и окислением аммония в нитраты. В вариантах с внесением растительных остатков клевера и тимофеевки, как и ожидалось, содержание аммиачного азота в почве оставалось соответственно в 1,9 и 1,6 раза выше по сравнению с контролем. В присутствии биоугля аммиачный азот, образующийся при разложении растительных остатков клевера и тимофеевки, менее интенсивно трансформировался в нитраты, что способствовало накоплению $N-NH_4^+$ в почве и выразилось в 20- и 19-кратном увеличении его

содержания в конце эксперимента по сравнению с вариантом с биоуглем. Подобные результаты были получены в лабораторных исследованиях Лэйрда с соавт. (Laird et al., 2010) и Мэйджора с соавт. (Major et al., 2012), в которых установлено снижение количества нитратного азота в вариантах с внесением биоугля по сравнению с вариантами с азотными источниками без биоугля.

За 90 дней эксперимента абсолютное значение содержания $N-NO_3^-$ в почве по вариантам опыта было существенно выше, чем содержание аммонийного азота, что свидетельствует о достаточно быстром

окислении последнего в супесчаной почве при оптимальных условиях. По окончании компостирования было выявлено, что внесение биоугля способствовало достоверному увеличению содержания $N-NO_3^-$ в почве на 16%, клевера и тимopheевки – на 21 и 12% соответственно по сравнению с контролем. Совместное внесение клевера с биоуглем привело к незначительному снижению содержания данной формы азота в почве по сравнению с соответствующим вариантом с внесением растительных остатков.

Таблица 2. Содержание аммонийного и нитратного азота и нитрифицирующая способность почвы при внесении биоугля и растительных остатков клевера и тимopheевки в начале (3-е сутки) и конце (90-е сутки) эксперимента

Вариант	$N-NH_4^+$		$N-NO_3^-$		НСП
			мг kg^{-1}		
	3 сут	90 сут	3 сут	90 сут	90 сут
Почва	9,5a	3,5b	14,2d	45,0a	32,2a
Почва + биоуголь	8,5a	1,0a	13,5d	56,4d	43,4b
Почва + клевер	37,0c	6,5c	4,8a	95,4e	90,8e
Почва + биоуголь+ клевер	42,0d	20,5d	5,8a	94,3e	88,7d
Почва + тимopheевка	23,1b	5,5c	8,2c	57,7c	49,4c
Почва + биоуголь + тимopheевка	26,5b	19,5d	6,1b	49,2b	42,9b

Примечание: величины с разными буквами (a, b, c, d, e) существенно различаются при $p < 0,05$ (ANOVA, критерий Тьюки).

При совместном внесении биоугля и тимopheевки произошло достоверное снижение содержания нитратов в почве по сравнению с вариантом с внесением только тимopheевки. Очевидно, внесение клевера и тимopheевки без биоугля способствовало повышению интенсивности минерализационных процессов в почве, что связано с узким отношением C к N в растительных остатках по сравнению с биоуглем, имеющим широкое отношение C к N.

Результаты исследования показали, что внесение биоугля позволило повысить НСП почвы в 1,3 раза по сравнению с контролем, что связано с изменением реакции среды при применении мелиоранта. Внесение растительных остатков клевера привело к усилению НСП в 3,2 раза, тимopheевки – в 1,8 раза. При совместном внесении биоугля с клевером и тимopheевкой наблюдалась тенденция к снижению НСП, однако она существенно не отличалась от НСП почвы в вариантах с отдельным внесением растительных остатков.

Влияние биоугля на содержание лабильных соединений углерода, экстрагируемых горячей водой ($C_{эгв}$) по методу Шульц-Кершенса (1998), отображено на рис. 1. Результаты эксперимента показали, что внесение биоугля не привело к существенному увеличению содержания лабильных соединений углерода, экстрагируемых горячей водой, по сравнению с контролем. Внесение растительных остатков клевера и тимopheевки вызвало увеличение

количества лабильного углерода в почве в 1,8 и 1,2 раза соответственно. При совместном внесении биоугля с клевером содержание лабильных веществ углерода в почве достоверно увеличилось к концу эксперимента и было наибольшим ($321 \text{ мг } kg^{-1}$) среди вариантов опыта. Можно заключить, что внесение биоугля стабилизировало образование $C_{эгв}$ в данном варианте эксперимента, по-видимому, за счёт ингибирования активности гидролитических ферментов, как было установлено в работе Цао с соавт. (Cao et al., 2017).

При внесении в почву растительных остатков тимopheевки совместно с биоуглем содержание лабильных $C_{эгв}$ в почве было в 1,4 ниже, чем при внесении биоугля с растительными остатками клевера. Это связано в том числе с менее интенсивной минерализацией тимopheевки по сравнению с клевером из-за более широкого отношения C:N.

Влияние биоугля и растительных остатков на содержание лабильных соединений азота в составе соединений углерода, экстрагируемых горячей водой ($C_{эгв}$), отображено на рис. 2. Через 90 дней компостирования почвы с биоуглем количество $N_{эгв}$ достоверно уменьшилось (на 13%) по сравнению с контролем, что связано либо с увеличением численности микроорганизмов под влиянием биоугля (Kim et al., 2004; Lehmann et al., 2011), либо с минерализацией азотсодержащих органических соединений до аммония и нитратов и сорбцией биоуглем аминокислот, аминсахаров и других соединений азота.

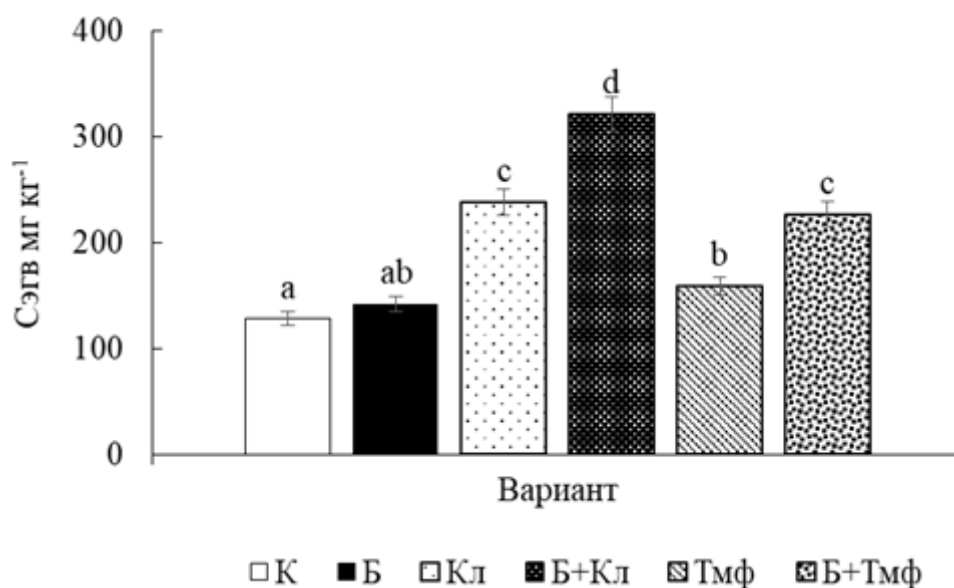


Рис. 1. Содержание лабильных соединений углерода в почве после 90 дней компостирования при внесении биоугля и растительных остатков клевера и тимофеевки. Здесь и далее:

К – контроль; Б – биоуголь; Кл – клевер; Тмф – тимофеевка. Величины с разными буквами (a, b, c, d, e, f) существенно различаются при $p < 0,05$ (ANOVA, критерий Тьюки)

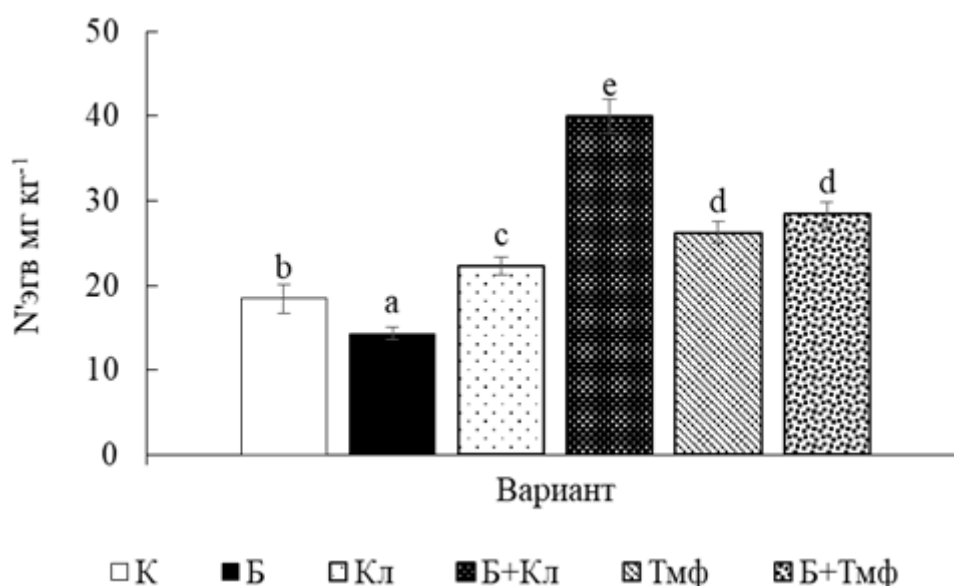


Рис. 2. Содержание лабильного азота, экстрагируемого горячей водой, при внесении в почву биоугля и растительных остатков

Наибольшее содержание $N_{эгв}$ к концу эксперимента установлено при совместном внесении биоугля с клевером (40 мг kg^{-1}). Клевер без биоугля минерализовался в почве быстрее, что выразилось в двухкратном уменьшении его содержания по сравнению с вариантом, в котором он вносился совместно с биоуглем. Известно, что интенсивность преобразования растительных остатков с узким отношением C:N, к которым относится клевер, в дерново-подзолистых почвах достаточно высока, что приводит к усилению микробиологической активности и потерям азота в результате жизнедеятельности микроорганизмов, например в результате денитрификации (Рижия и др., 2011). Присутствие в почве биоугля как более инертного компонента

способствовало изменению физических условий среды микроорганизмов и снижению скорости минерализации клевера, что содействовало накоплению легкоразлагаемых соединений почвенного азота. При внесении тимофеевки с биоуглем количество $N_{орг}$ в составе $C_{эгв}$ к концу эксперимента было на 70% ниже, чем при внесении клевера с биоуглем. Это также объясняется более широким отношением C:N в тимофеевке по сравнению с клевером. При этом существенных различий между вариантами опыта с внесением только тимофеевки и совместным внесением тимофеевки с биоуглем не наблюдалось.

Таким образом, количество доступного растениям азота, состоящего из минеральных форм и

легкоразлагаемых органических соединений, накопившегося в почве за три месяца ее компостирования с биоуглем и растительными остатками, различалось по вариантам опыта.

Влияние биоугля и растительных остатков на сухую биомассу кукурузы отображено на рис. 3. Внесение биоугля не привело к существенному увеличению количества сухой биомассы кукурузы по сравнению с контролем. При совместном внесении биоугля и растительных остатков клевера величина сухой биомассы кукурузы возросла на 81% по

сравнению с контролем, однако воздействие только клевера (без биоугля) было на 33% более эффективным. При внесении в почву биоугля с растительными остатками тимopheевки величина сухой биомассы кукурузы была достоверно меньше по сравнению с вариантом с совместным внесением биоугля и растительных остатков клевера, в то время как в вариантах с внесением растительных остатков клевера и тимopheевки без биоугля отмечена максимальная биомасса кукурузы, составляющая 2,6 и 2,4 г на сосуд соответственно.

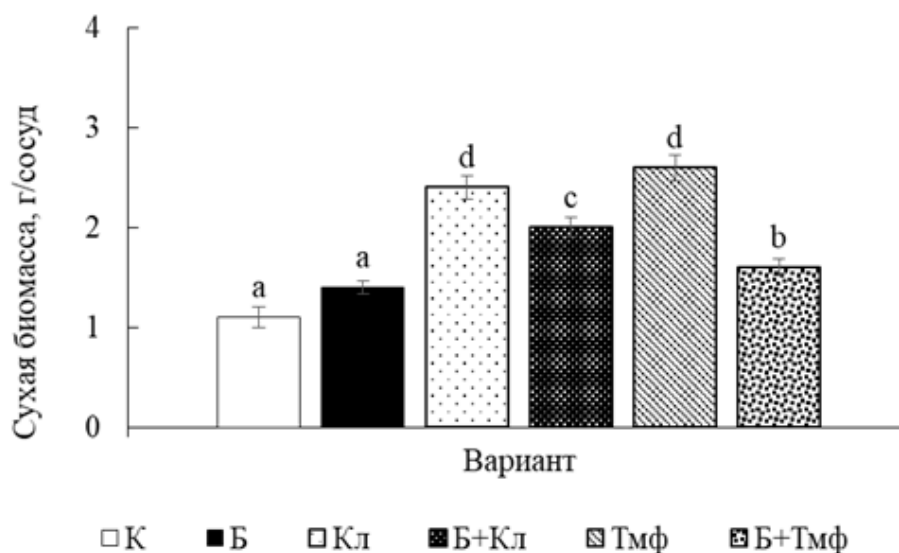


Рис. 3. Сухая биомасса кукурузы при внесении биоугля и растительных остатков

Таким образом, совместное внесение биоугля и растительных остатков привело к снижению сухой биомассы кукурузы по сравнению с вариантом с внесением только растительных остатков.

В табл. 3 представлены данные по содержанию в почве доступных для растений форм азота, состоящих из минеральных форм и легко разлагаемого органического азота, а также о выносе его растениями. Наибольший вынос азота растениями кукурузы наблюдался при внесении в почву растительных остатков клевера (39 мг сосуд⁻¹). Данная величина достоверно отличалась от показателей, отмеченных в

других вариантах опыта. При добавлении к растительным остаткам клевера биоугля поступление азота в растения достоверно снизилось до 31 мг сосуд⁻¹. При внесении растительных остатков тимopheевки закономерность была аналогичной: в варианте без внесения биоугля из почвы в растения поступило 31 мг N сосуд⁻¹, а с биоуглем – 23 мг N сосуд⁻¹. Внесение в почву биоугля без растительных остатков не привело к увеличению поступления азота в растения по сравнению с контролем.

Таблица 3. Содержание в почве различных форм доступного азота и усвоение их растениями кукурузы при внесении биоугля и растительных остатков

Вариант	Вынос N растениями, мг сосуд ⁻¹	Доступный N _{орг} в составе C _{эгв} , мг сосуд ⁻¹	ΣN-NO ₃ +N-NH ₄ , мг сосуд ⁻¹	Общий доступный N, мг сосуд ⁻¹	Вынос от общего доступного N, %
Почва	18,0a	16,5ab	45,3d	61,8c	30,3a
Почва + биоуголь	20,0ab	15,5ab	38,7c	53,8b	38,2b
Почва + клевер	39,0d	11,1a	51,5e	62,6c	62,5d
Почва + биоуголь + клевер	31,0c	18,4b	57,6f	76,0d	40,8b
Почва + тимopheевка	31,0c	13,1ab	31,6a	44,7a	70,1d
Почва + биоуголь + тимopheевка	23,0b	11,2a	34,7b	45,9a	49,7c

Следует обратить внимание, что внесение растительных остатков клевера совместно с биоуглем способствовало достоверному увеличению поступления азота в растения (31 мг сосуд^{-1}) по сравнению с вариантом с внесением только биоугля (20 мг сосуд^{-1}), а при внесении растительных остатков тимopheевки совместно с биоуглем существенных различий не наблюдалось (табл. 3).

Содержание лабильного органического азота в почве перед посадкой растений находилось в пределах $11\text{--}18 \text{ мг сосуд}^{-1}$. Указанные значения были ниже по сравнению с количеством азота, вынесенного растениями кукурузы во всех вариантах опыта за исключением контрольного варианта, где для растений был доступен только почвенный азот. Абсолютное значение содержания легкоразлагаемого лабильного азота в почве было довольно низким в связи с интенсивной минерализацией азота в оптимальных гидротермических условиях в течение 90 дней инкубации почвы.

Коэффициент усвоения растениями доступного азота являлся наименьшим в контроле (30%). В вариантах с внесением биоугля он колебался от 38 до 49%, а в вариантах с внесением только растительных остатков процент усвоения доступного растениям азота от его содержания в почве составил 62–70% и достоверно не различался по вариантам с внесением растительных остатков клевера и тимopheевки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 90-дневном лабораторном эксперименте установлено, что внесение биоугля не оказало

достоверного влияния на содержание С_{эгв} в дерново-подзолистой супесчаной почве, но вызвало достоверное снижение (на 13%) количества N_{эгв} в почве к концу эксперимента. Применение биоугля привело к достоверному увеличению биомассы растений кукурузы, но достоверно не повлияло на поступление в них азота при совместном внесении с тимopheевкой.

Внесение растительных остатков клевера и тимopheевки способствовало усилению процессов минерализации органического вещества в почве, что сопровождалось увеличением содержания в ней водорастворимого лабильного углерода и снижением количества водорастворимого органического азота. При внесении в почву растительных остатков клевера и тимopheевки усилилось поступление азота в растения кукурузы, что привело к увеличению их биомассы. Влияние растительных остатков клевера на перечисленные показатели было более высоким, чем влияние растительных остатков тимopheевки.

Внесение биоугля в сочетании с растительными остатками (особенно клевера) привело к снижению эффективности воздействия последних на интенсивность минерализационных процессов в почве, азотное питание и формирование биомассы растений кукурузы.

Растительные остатки бобовых культур целесообразно вносить в почву в сочетании с биоуглем для снижения интенсивности их минерализации и обеспечения пролонгированного поступления азота в растения.

Список литературы

- Безуглова О. С., Орлов Д. С. Биогеохимия. Ростов-на-Дону: «Феникс». 2000. 320 с.
- Кершенс М. Значение содержания гумуса для плодородия почв и круговорота азота // Почвоведение. 1992. № 10. С. 122–131.
- Методические указания по определению нитрификационной способности почв. М.: ВПНО «Сельхозхимия», 1984. 16 с.
- Рижия Е. Я., Бойцова Л. В., Бучкина Н. П., Панова Г. Г. Влияние пожнивных остатков с различным отношением C/N на эмиссию закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1251–1259.
- Рижия Е. Я., Мухина И. М., Банкина Т. А., Хомяков Ю. В. Биологические процессы в ризосфере ячменя и клевера красного на агродерново-подзолистой почве // Агрофизика. 2018. № 3. С. 25–30.
- Шульц Э., Кершенс М. Характеристика разлагаемой части органического вещества почв и ее трансформации при помощи экстракции горячей водой // Почвоведение. 1998. № 7. С. 890–894.
- Юдкевич Ю. Д., Васильев С. Н., Ягодин В. И. Получение химических продуктов из древесных отходов. СПб.: ЛТА, 2002. 84 с.
- Asai H., Samson B. K., Stephan H. M., Songyikhangsuthor K., Inoue Y., Shiraiwa T., Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: soil physical properties, leaf SPAD and grain yield // Field Crops Res., 2009, v. 111, pp. 81–84.
- Cao T., Meng J., Liang H., Yang X., Chen W. Can biochar provide ammonium and nitrate to poor soils? Soil column incubation // Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2017, v. 17(2), pp. 253–265.
- Kerre B., Willaert B., Cornelis Y., Smolders E., Long-term presence of charcoal increases maize yield in Belgium due to increased soil water availability // Eur. J. Agron., 2017, v. 91, pp. 10–15.
- Laird D. L., Fleming P. D., Wang B., Horton R., Karlen D. L. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil // Geoderma, 2010, v. 158, pp. 436–442.
- Major J., Rondon M., Molina D., Riha S. J., Lehman J. Nutrient leaching in Colombian savanna Oxisol amended with biochar // Journal of Environment Quality, 2012, v. 41, pp. 1076–1086.
- Mukherjee A., Zimmerman A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures // Geoderma, 2013, v. 193–194, pp. 122–130.

- Nguyen B. T., Lehmann J., Kinyangi J., Smernik R., Riha S. J. and Engelhard M. H. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil // *Biogeochemistry*, 2008, v. 89(3), pp. 295–308.
- Novak J. M., Busscher W. J., Laird D. A., Ahmedna M. A., Niandou M. A. S. Short term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a TypicKunduidult // *Geoderma*, 2010, v. 154(3–4), pp. 281–288.
- Perdue E. M., Ritchie J. D. 5.10 – Dissolved organic matter in freshwaters. H. D. Holland, K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, New York, 2003. P. 273–318.
- Sun F., Lu S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil // *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2014, v. 177, pp. 26–33.
- Yao Y., Gao B., Zhang M., Inyang M., Zimmerman A. R. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil // *Chemosphere*, 2012, v. 89(11), pp. 1467–1471.

References

- Bezuglova O. S., Orlov D. S. *Biogeokhimiya* [Biogeochemistry]. Rostov-na-Donu: «Feniks», 2000, 320 p.
- Kershens M. Znachenije soderzhaniya gumusa dlya plodorodiya pochv i krugovorota azota [The value of the humus content for soil fertility and the nitrogen cycle]. *Pochvovedeniye*, 1992, no. 10, pp. 122–131.
- Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu nitrifikatsionnoy sposobnosti pochv* [Guidelines for determining the nitrification ability of soils]. Moscow: VPNO «Sel'khozkhimiia», 1984, 16 p.
- Rizhiya E. Ya., Boitsova L. V., Buchkina N. P., Panova G. G. Vliyaniye pozhnivnykh ostatkov s razlichnym otnosheniyem C/N na emissiyu zakisi azota iz dernovo-podzolistoy supeschanoy pochvy [The influence of crop residues with different C/N ratios on the N₂O emission from a loamy sandy soddy podzolic soil]. *Pochvovedeniye*, 2011, no. 10, pp. 1251–1259.
- Rizhiya E. Ya., Mukhina I. M., Bankina T. A., Khomyakov Yu. V. Biologicheskiye protsessy v rizosfere yachmenya i klevvera krasnogo na agrodernovo-podzolistoy pochve [Biological processes in the rhizosphere of barley and red clover on loamy sand spodosol soil]. *Agrofizika*, 2018, no. 3, pp. 25–30.
- Shul'ts E., Kershens M. Kharakteristika razlagayemoy chasti organicheskogo veshchestva pochv i yeye transformatsii pri pomoschi ekstraktsii goryachey vody [Characterization of the decomposable part of the soil organic matter and its transformation by extraction with hot water]. *Pochvovedeniye*, 1998, no. 7, pp. 890–894.
- Yudkevich Ju. D., Vasil'ev S. N., Yagodin V. I. *Polucheniye khimicheskikh produktov iz drevesnykh otkhodov* [Obtaining chemical products from wood waste]. Saint-Petersburg: LTA, 2002, 84 pp.
- Asai H., Samson B. K., Stephan H. M., Songyikhangsuthor K., Inoue Y., Shiraiwa T., Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: soil physical properties, leaf SPAD and grain yield // *Field Crops Res.*, 2009, v. 111, pp. 81–84.
- Cao T., Meng J., Liang H., Yang X., Chen W. Can biochar provide ammonium and nitrate to poor soils? Soil column incubation // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, v. 17(2), pp. 253–265.
- Kerre B., Willaert B., Cornelis Y., Smolders E., Long-term presence of charcoal increases maize yield in Belgium due to increased soil water availability // *Eur. J. Agron.*, 2017, v. 91, pp. 10–15.
- Laird D. L., Fleming P. D., Wang B., Horton R., Karlen D. L. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil // *Geoderma*, 2010, v. 158, pp. 436–442.
- Major J., Rondon M., Molina D., Riha S. J., Lehmann J. Nutrient leaching in Colombian savanna Oxisol amended with biochar // *Journal of Environment Quality*, 2012, v. 41, pp. 1076–1086.
- Mukherjee A., Zimmerman A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures // *Geoderma*, 2013, v. 193–194, pp. 122–130.
- Nguyen B. T., Lehmann J., Kinyangi J., Smernik R., Riha S. J. and Engelhard M. H. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil // *Biogeochemistry*, 2008, v. 89(3), pp. 295–308.
- Novak J. M., Busscher W. J., Laird D. A., Ahmedna M. A., Niandou M. A. S. Short term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a TypicKunduidult // *Geoderma*, 2010, v. 154(3–4), pp. 281–288.
- Perdue E. M., Ritchie J. D. 5.10 – Dissolved organic matter in freshwaters. H. D. Holland, K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, New York, 2003. P. 273–318.
- Sun F., Lu S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil // *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2014, v. 177, pp. 26–33.
- Yao Y., Gao B., Zhang M., Inyang M., Zimmerman A. R. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil // *Chemosphere*, 2012, v. 89(11), pp. 1467–1471.