

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ (ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

© 2015 г. Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, И. М. Мухина, А. С. Белинец, Е. В. Балашов

*Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14
e-mail: alenarizh@yahoo.com*

Поступила в редакцию 14.03.2013 г.

В 60-суточном лабораторном эксперименте провели исследование влияния биоугля на свойства пахотного горизонта дерново-подзолистой супесчаной почвы разной степени окультуренности. Установлено, что внесение биоугля привело к достоверному увеличению влажности почв в диапазоне потенциалов влаги от -5 до -50 кПа, достоверному уменьшению суммарной усадки высокоокультуренной почвы после трех циклов увлажнения–иссушения, накоплению в почве достоверно большего количества нитратов. При влажности 21% в почве с высокой степенью окультуренности формировались менее благоприятные условия для развития процесса денитрификации, чем в почве со средней степенью окультуренности, что привело к меньшей кумулятивной эмиссии N_2O из высокоокультуренной почвы. Внесение биоугля в исследуемые почвы не вызвало достоверных изменений в кумулятивной эмиссии CO_2 , но привело к достоверному уменьшению эмиссии N_2O из почв при совместном внесении биоугля и остатков клевера.

Ключевые слова: биоуголь, эмиссия парниковых газов, основная гидрофизическая характеристика, степень окультуренности почв.

DOI: 10.7868/S0032180X14120089

ВВЕДЕНИЕ

Биологическим углем (биоуглем) принято называть материал, получаемый из древесины и органических отходов путем пиролиза при температуре $300–800^\circ C$ без доступа кислорода. Естественным аналогом биоугля является так называемый “черный углерод” в почвах Терра Прета в Бразилии и в черноземных почвах в Германии [42, 35], накопившийся в результате регулярного сжигания травянистой и кустарниковой растительности в течение длительного времени. Одной из разновидностей биоугля является древесный уголь. Его основные свойства регламентирует ГОСТ 7657–84 “Уголь древесный”, в соответствии с которым, массовая доля золы, нелетучего органического углерода и воды должна составлять 2.5–4.0, 67–90 и не более 6% соответственно. Он характеризуется высоким содержанием устойчивых полиароматических углеводородов, нейтральной кислотностью, низкой кажущейся плотностью (не менее 0.37 г/см³) и высокой адсорбционной способностью [16].

Накопление “черного углерода” в почвах Терра Прета способствовало существенному увеличению их плодородия [29]. В настоящее время применение биоугля в сельском хозяйстве может

привести к увеличению секвестрации углерода из атмосферы, сохранению и улучшению физического, биологического и физико-химического качества и устойчивости почв, уменьшению эмиссии парниковых газов из почв [36, 48].

Вопросы о перспективах широкого применения биоугля в качестве мелиоранта до сих пор остаются открытыми, что объясняется существованием противоречивых данных о его влиянии на свойства почв. Внесение биоугля в почву может увеличить ее водоудерживающую способность в среднем на 6–15% [17, 56, 32]. Будучи материалом с высокой пористостью (70–80%) и истинной плотностью (до 1.45 г/см³), а также низкой эластичностью, биоуголь может улучшить агрегатное состояние почвы, увеличить ее общую пористость [44], а также повысить сопротивление почв к механическим нагрузкам [27].

Биоуголь может вызвать уменьшение содержания почвенного азота, доступного для растений. Новак с соавт. [37] установили, что внесение биоугля, полученного из скорлупы ореха-пекана, в дозе от 5 до 25 г/кг супесчаной почвы Turic Kandidult, привело к иммобилизации доступных форм азота в почве под яровым ячменем.

Таблица 1. Свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности

Показатель	Степень окультуренности почв	
	средняя	высокая
A, см	24	30
pH	5.4	6.1
S, %	58	72
C общ, г/кг почвы	18–22	26–34
P ₂ O ₅ , мг/100 г почвы	23–29	40–51
K ₂ O, мг/100 г почвы	11–21	27–54
ρ, г/см ³	1.1–1.3	0.9–1.1
ПВ, % от массы	36.4	40.8
КВ, % от массы	33.0	36.7
ДБ, N × 10 ⁶ г почвы	1.6	2.8
НБ, N × 10 ⁶ г почвы	0.03	0.05

Примечание. A – мощность гумусового горизонта; S – степень насыщенности почв основаниями; ρ – плотность сложения почвы; ПВ – полная влагоемкость почвы, КВ – капиллярная влагоемкость почвы; ДБ – количество денитрифицирующих бактерий в сухой почве; НБ – количество нитрифицирующих бактерий в сухой почве.

Биоуголь способствует повышению активности, группового и функционального разнообразия почвенного микробного сообщества. Например, стимулирует развитие почвенных плесневых грибов и аэробных целлюлозоразлагающих бактерий, являющихся активными потребителями азота и подавляющих рост азотобактера [30, 47, 49].

Применение биоугля может способствовать достоверному снижению эмиссии N₂O и CO₂ [34]. Переработка биомассы растений в биоуголь и его внесение в почву в форме ароматических органических соединений, труднодоступных для почвенных микроорганизмов приводит, с одной стороны, к уменьшению эмиссии CO₂ и, с другой стороны, к накоплению углерода в почвах [49].

Влияние биоугля на эмиссию парниковых газов из почв зависит от дозы его внесения. Например, установлено, что применение биоугля в дозах от 5 до 10 т/га на почвах грубого гранулометрического состава приводило к уменьшению эмиссии CO₂, а в дозе больше 10 т/га – к повышению [26]. Однако, согласно результатам Ванг с соавт. [53], внесение биоугля в дозе 50 т/га не способствовало увеличению эмиссии CO₂ из почв рисовых полей.

Оксид азота(I) (N₂O) является одним из парниковых газов, эмиссию которого необходимо регулировать с помощью рациональных и эффективных сельскохозяйственных мероприятий. В России эмиссия N₂O из сельскохозяйственных почв составляет 68.9% от суммарной эмиссии из всех источников [10]. Использование биоугля может быть одним из способов уменьшения эмиссии N₂O

из сельскохозяйственных почв [52]. Рондон с соавт. [39, 40] показали, что внесение биоугля в почву под сорго зерновое (*Sorghum bicolor* L.) вызвало сокращение эмиссии N₂O на 50%, а под многолетние травы – на 80%. В других исследованиях получены результаты о достоверном снижении эмиссии N₂O из почв после применения биоугля под редькой огородной (*Raphanus sativus* L.) и о недостоверном повышении из почв под озимой пшеницей (*Triticum aestivum* L.) [50].

Биоуголь способствует сокращению потерь азота в форме N₂O вследствие улучшения водно-воздушного режима почвы и ослабления процесса денитрификации. Рядом ученых [38, 43, 50] показано, что эмиссия N₂O уменьшалась после внесения биоугля в почву даже при повышении доли водонасыщенных пор до 78%, то есть в анаэробных условиях, при которых активно протекает процесс денитрификации. Однако в исследованиях Янай с соавт. [56] установлено, что внесение биоугля в почву, в которой доля водонасыщенных пор составляла больше 83%, привело к усилению денитрификации и к достоверному увеличению эмиссии N₂O.

Уменьшение эмиссии N₂O из почв может быть также обусловлено широким отношением C/N в биоугле. Скорость и направленность физико-химических и микробиологических процессов в почвах зависят от величины C/N. Если это отношение в органическом субстрате меньше, чем у почвенных микроорганизмов, осуществляющих его гидролиз, то в почве наблюдается накопление минеральных форм азота, тогда как в противоположном случае, происходит иммобилизация азота [13, 14, 29].

Решение проблемы рационального применения биоугля в сельском хозяйстве требует проведения дополнительных исследований. Цели исследований заключались в оценке влияния биоугля на физические, физико-химические и биологические свойства почв, а также на эмиссию оксида азота(I) (N₂O) и углекислого газа (CO₂) из пахотного горизонта дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполняли на дерново-подзолистой супесчаной почве. Образцы почвы для лабораторного эксперимента отбирали из пахотного горизонта (0–30 см) агрофизического стационара Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института Россельхозакадемии, расположенного в Гатчинском р-не Ленинградской обл. Пахотные горизонты почв агрофизического стационара отличались по ряду агрохимических, физических и микробиологиче-

Таблица 2. Характеристика биоугля и клевера красного

Вещество	С общ	Н общ	С/Н	рН водный	Влажность	Зола
	г/кг				%	
Биоуголь	825.5	2.7	302.4	7.0	1.9	0.2
Клевер красный	360.0	20.0	18.0	6.3	69.9	1.7

ских параметров (табл. 1), что позволило отнести их к почвам средней и высокой степени окультуренности [9, 18].

Изучали биоуголь с размером частиц не более 1 см, полученный из древесины березы и осины. В эксперименте использовали исходные почвы и почвы, в которые вносили растительные остатки клевера красного (*Trifolium pratense* L.). В табл. 2 представлена химическая характеристика биоугля и пожнивных остатков клевера. Клевер служил источником доступного углерода и азота, способствующих существенному увеличению эмиссии обоих парниковых газов из почв в течение короткого времени [13]. Исследуемые почвы, как показано ранее [19, 21], характеризуются низкими эмиссиями N_2O , тогда как выявление достоверности влияния биоугля на эмиссии CO_2 и N_2O целесообразнее проводить на фоне высоких эмиссий этих газов. Высокие эмиссии CO_2 и N_2O наблюдаются в полевых условиях после внесения в почвы органических, минеральных и зеленых удобрений, а также при поступлении в почвы растительных остатков после каждой уборки урожая [19, 21].

До закладки эксперимента образцы почв высушили до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре $+22^\circ C$. Нарушенные образцы почвы увлажнили до влажности 21% (от массы), соответствующей наименьшей влагоемкости в средне окультуренной почве, и поместили в пластмассовые трехлитровые сосуды с герметично закрывающимися крышками. Крышки были оборудованы трехходовыми кранами для отбора образцов воздуха из сосудов для измерения концентрации CO_2 и N_2O . Образцы почвы для изучения динамики содержания минерального азота (N мин) отбирали из сосудов один раз в две недели.

Агрохимический анализ образцов почв выполняли по стандартным методикам [12]. Измерения основной гидрофизической характеристики (ОГХ) исходных почв, их влажности набухания и усадки с добавлением биоугля и без него проводили в насыпных образцах [11, 45]. Часть кривой ОГХ в диапазоне потенциалов влаги от 0 до -100 кПа (характеризующем легкодренируемые поры и поры инфильтрации [3]) измеряли также после проведения лабораторного эксперимента для образцов почв с ненарушенным сложением, поскольку установили, что при внесении биоугля содержание влаги изменяется именно в этом диапазоне

потенциалов влаги. Для измерения ОГХ образцы почв отбирали с помощью режущих цилиндров из вегетационных сосудов, в которых в течение двух месяцев проводили лабораторный эксперимент.

В течение первой недели эксперимента инкубирование почвы проводили без внесения биоугля и клевера с целью достижения в ней равновесного состояния влаги и микробного сообщества. Спустя неделю, в почву внесли биоуголь в дозе 9.02 г/сосуд, что соответствовало 4 т/га. Воздушно-сухие остатки клевера внесли в дозе 15.0 г/сосуд, которая соответствовала 132 кг общего N/га и 2380 кг общего С/га. Количество растительных остатков, использованных в эксперименте, рассчитывали исходя из количества пожнивных остатков клевера, остающихся в поле после его уборки [13]. Биоуголь и клевер равномерно перемешивали с почвой. Плотность сложения почвы в эксперименте составляла 1.2 г/см³, что соответствовало ее равновесной плотности сложения в полевых условиях. Схема опыта включала следующие варианты: 1) почва – контроль (почва без биоугля и клевера); 2) почва с биоуглем; 3) почва с клевером; 4) почва со смесью биоугля и клевера. Повторность опыта – четырехкратная. Сосуды в эксперименте располагали в рандомизированном порядке. Эксперимент проводили при постоянной комнатной температуре воздуха $+22^\circ C$. На протяжении всего эксперимента сосуды с почвой оставляли открытыми.

Отбор образцов воздуха выполняли ежедневно на протяжении первых двух недель после внесения биоугля в почву, а в последующие дни – 2–3 раза в неделю. Для этого сосуды с почвой герметично закрывали и отбирали из них образцы воздуха через 40 и 60 мин для измерения концентраций N_2O и CO_2 соответственно. Общая продолжительность эксперимента составляла 60 сут. После каждого отбора проб воздуха проводили увлажнение почвы по весу сосудов до изначально заданной влажности почвы. Анализ концентрации N_2O в образцах воздуха выполняли на газовом хроматографе Carlo Erba Strumentazione 4130, оснащенный детектором электронного захвата (температура детектора – $380^\circ C$, скорость потока газа-носителя – 40–50 мл/мин, газ-носитель – азот высокой чистоты). Чувствительность детектора к N_2O позволяла измерять концентрацию этого газа в атмосферном воздухе с ошибкой 1%. Концентрацию CO_2 в образцах воздуха определяли

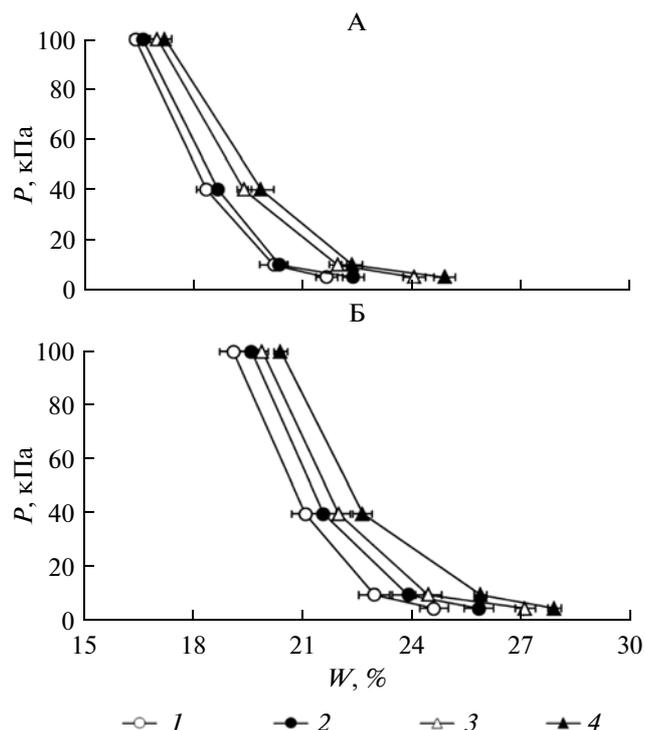


Рис. 1. Основная гидрофизическая характеристика дерново-подзолистой супесчаной почвы со средней (А) и высокой (Б) степенью окультуренности при внесении биоугля и остатков клевера: 1 – контроль; 2 – биоуголь; 3 – клевер; 4 – клевер + биоуголь.

на газовом хроматографе с детектором по теплопроводности и с гелием в качестве газа-носителя.

Пакет программ Statistics 5.0 использовали для статистической обработки данных. Статистическая обработка результатов включала вычисления значений средних, стандартных отклонений и коэффициентов линейной корреляции при уровне надежности $P \leq 0.05$. Достоверность различий средних значений оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при $P \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водоудерживающую способность исходной средне- и высокоокультуренной почвы, а также изменение этой способности после внесения биоугля оценивали по ОГХ насыпных образцов почв. Результаты исследования показали, что влажность исходной высокоокультуренной почвы в диапазоне потенциалов влаги от -5 до -1500 кПа изменялась от 24.6 до 6.6% и была достоверно ($P < 0.001$) выше, чем в среднеокультуренной почве, в которой влажность изменялась от 21.6 до 4.6% в том же диапазоне потенциалов влаги. Эти результаты согласуются с данными других ученых [5, 8, 15, 38], отмечавших большую способность почв удерживать воду с увеличением степени их окуль-

туренности и обогащенности органическим веществом.

Внесение биоугля в исходные почвы привело к достоверному ($P < 0.001$) увеличению количества удерживаемой ими влаги. Однако это увеличение наблюдалось только в диапазоне потенциалов влаги от -5 до -50 кПа, характеризующем легкодренируемые поры и поры инфильтрации с капиллярно-гравитационной водой [3]. В этом диапазоне потенциалов почвенной влаги влажность среднеокультуренной почвы с биоуглем изменялась от 34.5 до 30.6%, а высокоокультуренной почвы с биоуглем – от 41.5 до 35.7%, в то время как влажность средне- и высокоокультуренной почвы без биоугля варьировала, соответственно, от 32.7 до 28.1% и от 38.7 до 33.6%. При потенциалах влаги ниже -50 кПа влияние биоугля на водоудерживающую способность обеих почв было недостоверным. Биоуголь обладает высокой общей пористостью ($>70\%$) и удельной поверхностью (от 30 до $700 \text{ м}^2/\text{г}$). В зависимости от степени окисления биоуголь может быть гидрофобным (в свежеприготовленном состоянии) или гидрофильным (при длительном хранении на воздухе) [31, 33]. Чем больше пор содержит биоуголь и чем дольше он хранится, тем сильнее проявляются его адсорбционная и водоудерживающая способность [22, 29, 50]. В описываемом эксперименте использовали биоуголь, длительное время хранившийся на воздухе и обладавший гидрофильными свойствами. Поэтому внесение биоугля в супесчаную почву привело к повышению ее адсорбционной и водоудерживающей способности. Плазер с соавт. [29] также обнаружили, что водоудерживающая способность легкой по гранулометрическому составу почвы (Amazonian Anthrosol) возрастала после внесения в нее биоугля.

В образцах почв с ненарушенным сложением, исследованных после окончания лабораторного эксперимента, установили, что при потенциале влаги -5 кПа в почве со средней степенью окультуренности (рис. 1А) наибольшее количество влаги удерживали почвы, в которые вносили остатки клевера (24.0%) или остатки клевера с биоуглем (24.8%). По мере уменьшения потенциала влаги до -100 кПа из всех вариантов эксперимента только почва с совместным внесением клевера и биоугля удерживала достоверно ($P < 0.05$) больше влаги. В почве с высокой степенью окультуренности (рис. 1Б) наибольшую водоудерживающую способность при потенциале влаги -5 кПа наблюдали в варианте с совместным внесением клевера и биоугля (27.9%). Водоудерживающая способность почвы при потенциалах влаги от -5 до -100 кПа также оставалась достоверно наибольшей ($P < 0.001$) в этом варианте, по сравнению с тремя другими вариантами, между которыми достоверные различия не наблюдались.

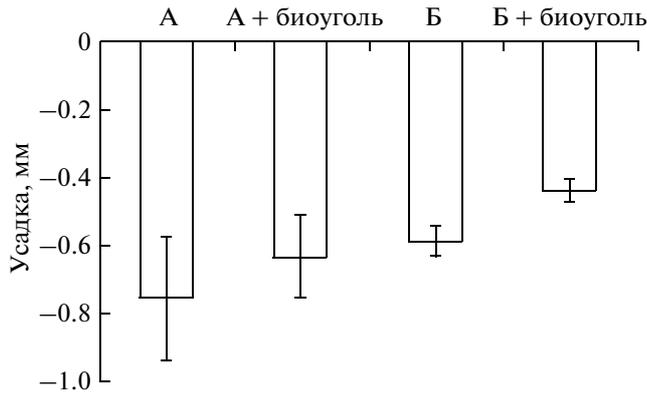


Рис. 2. Суммарная усадка после трех циклов увлажнения и иссушения дерново-подзолистой супесчаной почвы со средней (А) и высокой (Б) степенью окультуренности в вариантах с биоуглем и без биоугля.

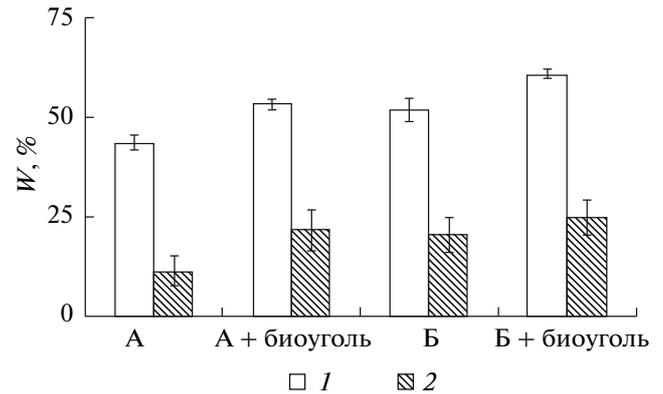


Рис. 3. Влажность дерново-подзолистой супесчаной почвы со средней (А) и высокой (Б) степенью окультуренности в вариантах с биоуглем и без биоугля при ее максимальном набухании (1) и максимальной усадке (2) после трех циклов увлажнения и иссушения.

В исследованиях других ученых показано, что гранулометрический состав почв оказал существенное влияние на эффективность воздействия биоугля на гидрофизические свойства почв. Биоуголь имел более благоприятное воздействие на водоудерживающую способность в почвах легкогранулометрического состава, тогда как по мере увеличения содержания ила в почвах эффективность биоугля ослабевала, поскольку глинистые минералы обладали большим сродством к воде [36, 54].

Набухание и усадка почвы происходят при их увлажнении и иссушении и являются основными процессами, ответственными за формирование равновесной плотности сложения почв. Результаты исследований показали, что после трех циклов увлажнения и иссушения суммарные усадки средне- и высокоокультуренной почвы достоверно не различались (рис. 2). Внесение биоугля привело к появлению в почве твердых органических частиц, обладавших более высокой гидрофильностью и эластичностью, чем ее минеральная твердая фаза, и, как следствие, к снижению суммарной усадки обеих почв. Влияние биоугля на суммарную усадку оказалось статистически достоверным ($P < 0.05$) только в высокоокультуренной почве.

Результаты показали, что как после трех циклов набухания, так и после трех циклов усадки высокоокультуренная почва удерживала больше влаги, чем среднеокультуренная, при этом различия во влажности набухания между этими почвами составляли 8.8%, а во влажности усадки — 9% (рис. 3). Достоверное увеличение влажности набухания и усадки средне- и высокоокультуренной почвы после внесения биоугля, по-видимому, связано не только с его большей пористостью, но и с большим сродством к воде по сравнению с минеральной твердой фазой исследуемой почвы. Эти данные подтверждают, что увеличение степе-

ни окультуренности почвы и ее обогащение органическим веществом способствует увеличению степени гидрофильности и водоудерживающей способности почвы [9].

Изучение динамики содержания минерального азота в почвах показало, что в течение первых 14–29 дней эксперимента происходило накопление нитратов в почвах контрольных вариантов с последующим достоверным или недостоверным снижением их количества к концу эксперимента (рис. 4А). При этом в контрольном варианте содержание нитратов в высокоокультуренной почве оставалось достоверно ($P < 0.05$) выше, чем в среднеокультуренной на протяжении всего эксперимента. Внесение биоугля в средне- и высокоокультуренную почву привело к накоплению в почве достоверно большего количества нитратов, по сравнению с контрольными вариантами, что, по-видимому, свидетельствовало о более интенсивной нитрификации в почвах с биоуглем. Эти результаты согласуются с данными других исследователей, показавших, что внесение биоугля в почву с низким нитрификационным потенциалом способствовало повышению доступности минерального азота и увеличению интенсивности нитрификации [19]. Достоверность различий по этому показателю между средне- и высокоокультуренными почвами сохранялась ($P = 0.05$) после внесения биоугля. Внесение остатков клевера вызвало достоверное увеличение содержания нитратного азота в обеих почвах по сравнению с двумя другими вариантами. При этом накопление нитратов в обеих почвах наблюдалось в течение 43 дней эксперимента, но далее процесс нитрификации был выражен слабее.

Содержание аммонийного азота в обеих почвах контрольного варианта было очень низким и достоверно не изменялось на протяжении всего эксперимента. Различия по этому показателю

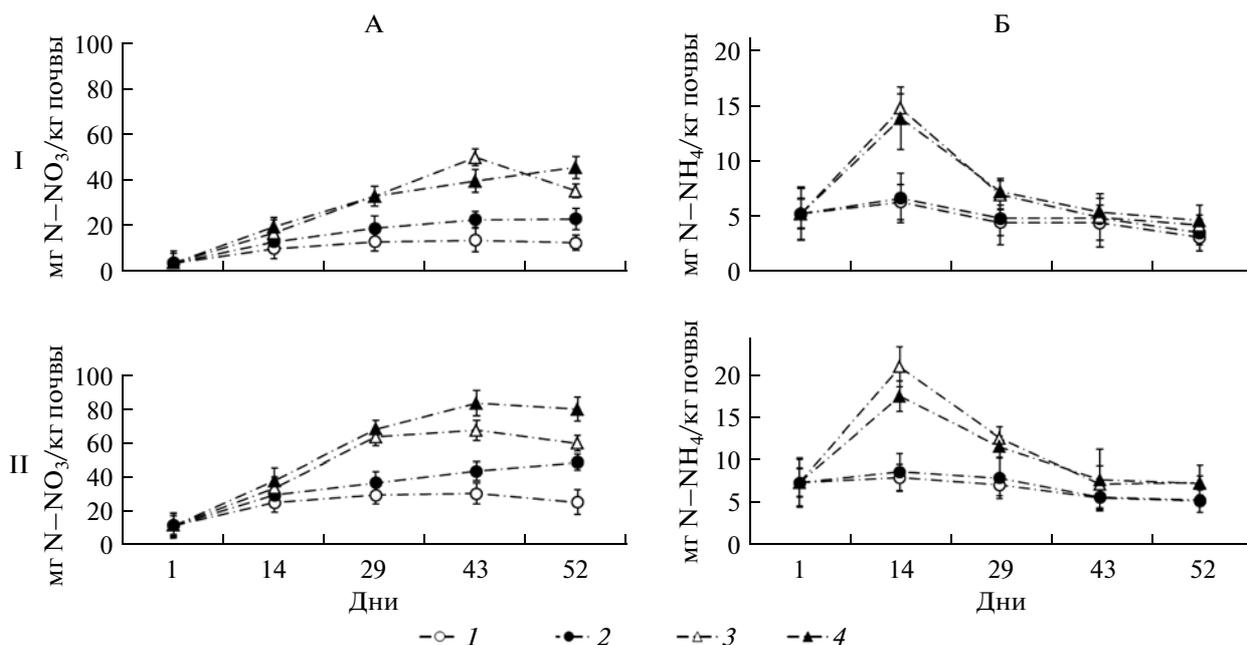


Рис. 4. Динамика содержания нитратного (А) и аммонийного (Б) азота в дерново-подзолистой супесчаной почве со средней (I) и высокой (II) степенью окультуренности при внесении биоугля и остатков клевера: 1 – контроль; 2 – биоуголь; 3 – клевер; 4 – клевер + биоуголь.

между почвами со средней и высокой степенью окультуренности были не достоверны. Внесение биоугля не оказало влияния на содержание в почвах аммонийного азота (рис. 4Б). Содержание аммонийного азота после внесения клевера достоверно повышалось к 14 дню эксперимента, но затем существенно снижалось, а, начиная с 29 дня эксперимента, достоверно не отличалось от данного показателя в почвах контрольного варианта и варианта почва + биоуголь.

Совместное внесение остатков клевера и биоугля привело к достоверному увеличению количества нитратного азота в высокоокультуренной почве, и к недостоверному – в среднеокультуренной по сравнению с контрольным вариантом. Совместное внесение остатков клевера и биоугля не оказало достоверного влияния на содержание аммонийного азота. Почвы вариантов клевер и клевер + биоуголь достоверно не отличались между собой по этому показателю.

В среднем содержание почвенного азота в аммонийной форме было в 4 раза меньше, чем в нитратной. Малое количество аммонийного азота в почве отнюдь не является свидетельством слабой аммонификации. Известно, что весь нитратный азот в почве образуется за счет окисления имеющегося в ней аммонийного азота. Отсюда следует, что высокая интенсивность нитрификации в почве косвенно свидетельствует об интенсивном образовании в ней аммонийного азота. Однако аммонийный азот не накапливается в большом количестве вследствие интенсивной

нитрификации [6]. Процесс окисления аммиака до нитратов протекает лишь при условии достаточной обеспеченности почвы кислородом и, следовательно, зависит от влажности и пористости аэрации почвы [2]. В эксперименте создавали благоприятные условия для процесса нитрификации: общая пористость почвы со средней степенью окультуренности в среднем составляла 53.8%, а с высокой степенью окультуренности – 57.4%; доля пор, занятых водой – 42. и 39.3% соответственно.

Содержание минерального азота в высокоокультуренной почве было в среднем в 1.8 раза выше, чем в среднеокультуренной. Это согласуется с данными других ученых [4, 7], утверждающих, что с увеличением степени окультуренности почв процессы аммонификации и нитрификации идут интенсивнее, и в почвах образуется больше минеральных соединений азота. Кроме того, накопление соединений минерального азота в почвах может быть связано с адсорбционными свойствами биоугля, которые обусловлены его химическим составом, особенно отношением $O : C$. Чем уже это отношение, тем больше адсорбционная способность биоугля. При длительном хранении биоугля отношение $O : C$ в нем становится шире, а его десорбционная способность возрастает, приводя к высвобождению азотсодержащих соединений, которые могут использоваться микроорганизмами в процессах аммонификации и нитрификации [46].

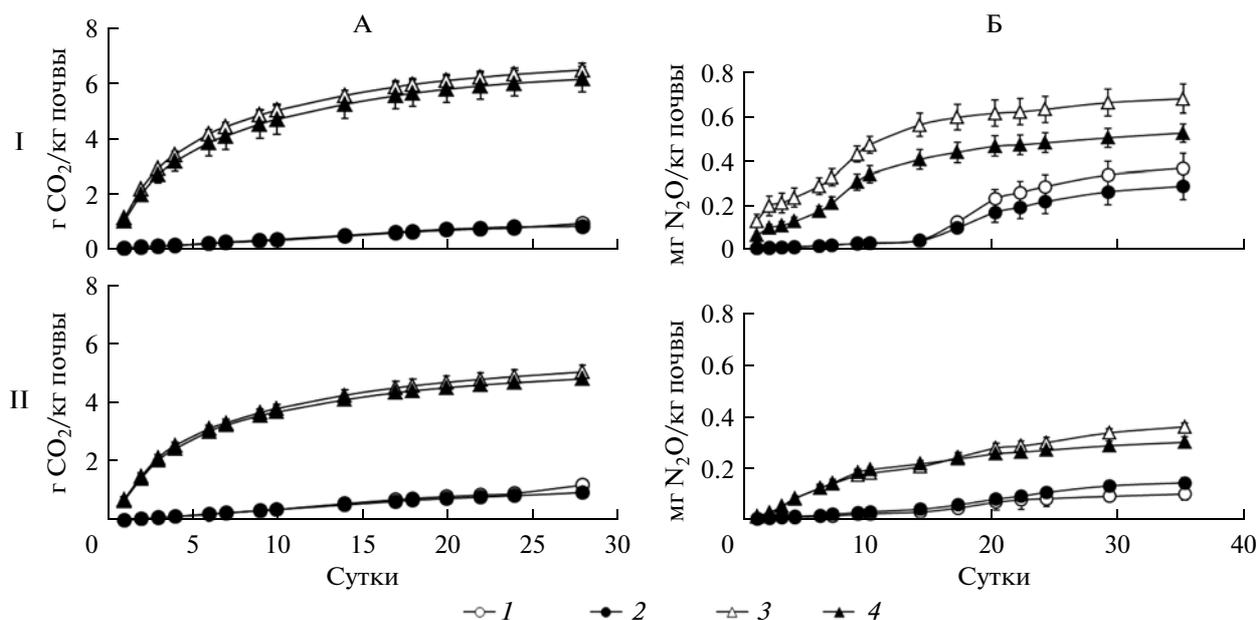


Рис. 5. Кумулятивная эмиссия CO_2 (А) и N_2O (Б) из дерново-подзолистой супесчаной почвы со средней (I) и высокой (II) степенью окультуренности при внесении биоугля и остатков клевера: 1 – контроль; 2 – биоуголь; 3 – клевер; 4 – клевер + биоуголь.

Результаты исследований показали, что применение биоугля не вызвало достоверных изменений в кумулятивной эмиссии CO_2 из средне- и высокоокультуренной почвы по сравнению с его эмиссией из почвы в контрольных вариантах. Достоверное увеличение эмиссии CO_2 из обеих почв было вызвано только внесением легкодоступных остатков клевера или совместным внесением остатков клевера и биоугля. Внесение биоугля совместно с клевером не привело к изменению кумулятивного потока CO_2 из почв по сравнению с вариантом почва + клевер. Тем не менее, в течение 32 дней эксперимента кумулятивные потоки CO_2 были больше из средне-, чем из высокоокультуренной почвы в связи с различиями в содержании влаги, которые привели к большей активности микробного сообщества в менее окультуренной почве (рис. 5А). На протяжении эксперимента в обеих почвах поддерживалось одинаковое содержание влаги (21% от массы). Такое содержание влаги характерно для исследуемых почв после выпадения небольшого количества осадков сразу после непродолжительной засухи [9]. Поддержание одинакового содержания влаги в обеих почвах в течение лабораторного эксперимента являлось имитацией выпадения одинакового количества осадков. Содержание влаги в высокоокультуренной почве не соответствовало ее наименьшей влагоемкости и, возможно, явилось лимитирующим фактором для микроорганизмов. Аналогичные данные получены в работах других ученых [28, 54], которые показали, что различия во влажности почвы ока-

зывали влияние на эмиссию CO_2 . Наибольшую кумулятивную эмиссию CO_2 из почв обычно наблюдали при доле водонасыщенных пор, составляющей 50–80% от полной влагоемкости.

Результаты исследований подтвердили данные ученых, которые показали, что внесение биоугля в почву не оказывало влияния на эмиссию CO_2 [39, 43]. Доступные органические соединения биоугля не подверглись быстрой минерализации микроорганизмами, тогда как внесение в почву легкоминерализуемых остатков клевера с узким соотношением C/N (~20) привело к усилению микробиологической активности и, как следствие, к увеличению эмиссии CO_2 из почвы.

Активность микробного сообщества в почве проявляется также в процессах трансформации соединений азота. Управление эмиссией N_2O из почв предусматривает эффективные воздействия на микробиологические процессы нитрификации и денитрификации. Образование N_2O в почве связано с качеством органического вещества и обычно возрастает в анаэробных почвенных условиях как результат процесса денитрификации [2].

Биоуголь обладает широким отношением C/N (табл. 2), что оказывает влияние на скорости минерализации и иммобилизации азота в пуле микробной биомассы и пулах почвенного органического вещества. Результаты исследований других ученых показали, что внесение в почву биоугля в качестве мелиоранта может приводить как к достоверному уменьшению эмиссии N_2O [43, 51],

так и к ее увеличению [25]. Результаты наших исследований демонстрируют, что внесение биоугля в высоко- и среднеокультуренную почву вызвало недостоверное увеличение кумулятивного потока N_2O по сравнению с контрольным вариантом. Это могло быть связано с усилением нитрификации после внесения биоугля и увеличением доступности азота биоугля для почвенных микроорганизмов (рис. 5Б). В работе Ананьевой с соавт. [1], изучавших взаимосвязь грибной и бактериальной микробной биомассы с продуцированием CO_2 и N_2O , показано, что при сельскохозяйственном использовании дерново-подзолистых почв может произойти разбалансированность микробиологических процессов, приводящая к увеличению или уменьшению эмиссии N_2O после внесения различных органических субстратов.

Внесение в почву остатков клевера, обогащенных доступным азотом и углеродом, вызвало достоверное увеличение эмиссии N_2O из исследованных почв. Однако совместное внесение остатков клевера с биоуглем привело к достоверному уменьшению кумулятивного потока N_2O только из среднеокультуренной почвы по сравнению с вариантом почва + клевер.

Кумулятивные потоки N_2O из среднеокультуренной почвы во всех вариантах опыта были достоверно выше, чем из высокоокультуренной, что, как и для потоков CO_2 , могло быть обусловлено вышеупомянутыми различиями в содержании почвенной влаги. Как показано в работе Дэвидсона [24], состав азотсодержащих газообразных продуктов, выделяющихся в процессе нитрификации, существенно зависит от влажности почв. В слабоувлажненных почвах продуктом нитрификации является NO , тогда как в среднеувлажненных почвах происходит образование NO и N_2O , а при сильном увлажнении почв продуктом деятельности нитрифицирующих микроорганизмов может являться и N_2 . К сожалению, мы не имели возможности измерять концентрации всех обсуждаемых газов, являющихся побочными продуктами нитрификации [41]. Все же предполагаем, что, несмотря на то, что высокоокультуренная почва обладала большей нитрификационной способностью, чем среднеокультуренная, формирование N_2O в результате нитрификации в высокоокультуренной почве было ограничено меньшим содержанием влаги. Условия для образования N_2O в процессе денитрификации, являющейся анаэробным процессом, также были менее благоприятными в высокоокультуренной почве из-за ее меньшей влажности. Косвенным свидетельством этого также является накопление нитратов в почве. При активном протекании процесса денитрификации нитраты, образующиеся в результате нитрификации, исполь-

зуются денитрифицирующими микроорганизмами, и их накопление в почве не происходит.

В полевых исследованиях с этими почвами показано, что при благоприятных условиях увлажнения высокоокультуренная почва часто характеризуется более высокими кумулятивными эмиссиями N_2O , чем среднеокультуренная [19–21].

Коэффициенты корреляции между кумулятивной эмиссией N_2O за 29 сут и содержанием нитратов в почвах были достоверно высокими и составили: 0.58 (контроль), 0.97 (биоуголь + остатки клевера) для среднеокультуренной почвы и 0.77 (контроль), 0.95 (биоуголь + остатки клевера) для высокоокультуренной почвы. Вклад нитрификации в эмиссию N_2O можно оценить по отношению $N_2O/N-NO_3^-$. Если допустить, что в варианте с остатками клевера вклад нитрификации в эмиссию N_2O в величинах этого отношения равен 100%, то в высокоокультуренной почве вклад нитрификации в эмиссию N_2O составлял 66% (в варианте с биоуглем) и 87% (в варианте биоуголь + остатки клевера). В среднеокультуренной почве показатели были значительно меньше – 22 и 60%. Эти данные подтверждают, что в высокоокультуренной почве нитрификация была основным источником N_2O , тогда как в среднеокультуренной почве роль этого процесса в формировании N_2O проявлялась значительно меньше.

Во всех исследованных вариантах опыта выявлены достоверно ($P < 0.001$) высокие положительные коэффициенты корреляции (0.92–0.99) между кумулятивными эмиссиями N_2O и CO_2 , что подтверждает высокую тесноту связей между потоками этих двух газов в почвах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате лабораторного эксперимента установили, что внесение биоугля в дерново-подзолистую супесчаную почву привело к достоверному увеличению доли легкодренируемых пор и пор инфильтрации с капиллярно-гравитационной влагой в диапазоне потенциалов влаги от –5 до –50 кПа в средне- и высокоокультуренной почве, достоверному уменьшению суммарной усадки высокоокультуренной почвы после трех циклов увлажнения и иссушения, накоплению в почве достоверно большего количества нитратов и, следовательно, более интенсивному процессу нитрификации. При одинаковой влажности (21% от массы) в дерново-подзолистой почве с высокой степенью окультуренности формировались условия менее благоприятные для нитрификации, чем в почве со средней степенью окультуренности. Это привело к меньшим кумулятивным потокам N_2O из высокоокультуренной почвы, хотя она обладала большей способностью к нитрификации, чем среднеокультуренная почва.

Внесение биоугля в средне- и высококультурную дерново-подзолистую почву не вызвало достоверных изменений в кумулятивной эмиссии CO₂ из исследуемых почв, но привело к увеличению эмиссии N₂O из почв по сравнению с контрольным вариантом. Достоверное уменьшение эмиссии N₂O наблюдали только из среднекультурной почвы после совместного внесения биоугля и остатков клевера по сравнению с вариантом почва + клевер.

Благодарность. Авторы выражают признательность профессору Санкт-Петербургского государственного университета растительных полимеров В.К. Дубовому за предоставление биоугля для проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьева Н.Д., Полянская Л.М., Стольников Е.В., Звягинцев Д.Г. Соотношение биомассы грибов и бактерий в профиле лесных почв // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2010. № 3. С. 308–317.
2. Благодатский С.А. Микробная биомасса и моделирование цикла азота в почве. Автореф. дис. ... докт. б. н. Пушино, 2012. 50 с.
3. Воронин А.Д. Кривая водоудерживаемости почвы // Почвенно-биогеоценотические исследования в лесных биогеоценозах. М., 1980. С. 80–87.
4. Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981. 267 с.
5. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 428 с.
6. Кудяров В.Н. Азотный цикл и продуцирование закиси азота // Почвоведение. 1999. № 8. С. 988–998.
7. Кулаковская Т.Н., Богдевич И.М., Ярошевич М.И. Методы определения оптимальных параметров агротехнических свойств, отражающих разную степень окультуренности и продуктивности почвы // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв. М., 1980. С. 5–15.
8. Моисеев К.Г. Определение удельной поверхности почв на основе величины гигроскопической влажности // Почвоведение. 2008. № 7. С. 845–849.
9. Оленченко Е.А., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // Агрофизика. 2012. № 4 (8). С. 8–18.
10. Пятое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. М., 2010. 196 с.
11. Растворова О.Г. Физика почв: практическое руководство. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 193 с.
12. Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. Химический анализ почв. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. 264 с.
13. 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.
14. Романовская А.А. Выбросы метана и закиси азота в аграрном секторе России // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 87–97.
15. Шеун Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
16. Bourk J., Manley-Harris M., Fushimi C., Dowaki K., Nunoura T., Antal M.J.Jr. Do all carbonised charcoals have the same structure? A model of the chemical structure of carbonized charcoal // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2007. V. 46. P. 5954–5967.
17. Brodowski S., John B., Fless H., Amelun W. Aggregate-occluded black carbon in soil // European J. of Soil Science. 2006. V. 57(4). P. 539–546.
18. Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Balashov E.V., Pavlik S.V. Influence of soil organic matter and nitrogen fertilizer on N₂O emission from a loamy sand podosol of North-Western region of Russia // Proceedings of Joint SAC/SEPA Biennial Conference “Land Management in a Changing Environment”. Edinburgh, UK. 2008. P. 203–208.
19. Buchkina N.P., Balashov E.V., Rizhiya E.Y., Smith K.A. Nitrous oxide emissions from a light-textured arable soil of North-Western Russia: effects of crops, fertilizers, manures and climate parameters // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2010. V. 87. P. 429–442.
20. Buchkina N., Rizhiya E., Balashov E. N₂O Emission from a loamy sand Spodosol as related to soil fertility // Archives of Agronomy and Soil Sciences. 2012. V. 58. Supp. 1. P. S141–S146.
21. Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Pavlik S.V., Balashov E.V. Soil Physical Properties and Nitrous Oxide Emission from Agricultural Soils // Advances in Agrophysical Research / Eds. Grundas S., Stepniewski A. InTech, Shanghai, 2013. P. 193–220.
22. Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic values of green waste bochar as a soil amendment // Austr. J. Soil Res. 2007. V. 45. P. 629–634.
23. Dabek-Szreniawska M., Kus J., Balashov E. Effects of two management practices on soil organic matter, microbial biomass carbon and wet aggregate stability in a loamy sand Orthic Luvisol // International Agrophysics. 2004. V. 18. P. 311–315.
24. Davidson E. A. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems // Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides, and halomethanes / Eds. Rogers J.E. and Whitman W.B. American Society for Microbiology, Washington, D.C., USA. 1991. P. 219–235.
25. DeLuca T.H., MacKenzie M.D., Gundale M.J. Biochar effects on soil nutrient transformations // Biochar for Environmental Management / Eds. Lehmann J., Joseph S. Science and Technology. London: Earthscan, 2009. P. 251–270.
26. Dempster D.N., Gleeson D.B., Solaiman Z.M., Jones D.L., Murphy D.V. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralization with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil // Plant and Soil. 2011 V. 354. P. 311–324.
27. Downie A., Crosky A., Munro P. Physical properties of biochar // Biochar for Environmental Management:

- Science and Technology/ Eds. Lehmann J., Joseph S. London: Earthscan, 2009. P. 13–29.
28. Fierer N., Schimel J.P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations // *Soil Biol. Biochem.* 2002. V. 34. P. 777–787.
 29. Glaser B., Lehmann J., Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review // *Biol. Fertil. Soils.* 2002. V. 35. P. 219–230.
 30. Grossman J.M., O'Neill B.E., Tsai S.M., Liang B., Neves E., Lehmann J., Thies J.E. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy // *Microbial Ecology.* 2010. V. 60. P. 192–205.
 31. Gundale M.J., DeLuca T.H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine / Douglas-fir ecosystem // *Biol. Fertil. Soils.* 2007. V. 43. P. 303–311.
 32. Karhu K, Mattilab T, Bergströma I, Reginac K Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2011 V. 140. P. 309–313.
 33. Kolb S.E., Fermanich K.J., Dornbush M.E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2009. V. 73. P. 1173–1181.
 34. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // *Science.* 2004. V. 304. P. 1623–1627.
 35. Lehmann J., Kern D., German L., McCann J., Martins G.C., Moreira L. Soil fertility and production potential. Chapter 6 // *Amazonian dark earths: origin, properties, management* / Eds. Lehmann J. et al. Kluwer Academic, Dordrecht. 2003. P. 105–124.
 36. Major J., Lehmann J., Rondon M., Goodale C. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration // *Glob. Chang. Biol.* 2010. V. 16. P. 1366–1379.
 37. Novak J.M., Bussher W.J., Watts D.W., Laird D.L., Ahmedna M., Niandou M.A.S. Short-term CO₂ mineralisation after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandiuult // *Geoderma.* 2010. V. 154. P. 281–288.
 38. Rajkaia K., Kabosa S., van Genuchten M.Th. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods // *Soil & Tillage Research.* 2004. V. 79. P. 145–152.
 39. Rondon M., Ramire J.A. & Lehmann J. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils // *Proceedings of the Third USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration*, Baltimore, Soil Carbon Centre. Kansas State University, United States Department of Agriculture, 2005.
 40. Rondon M.A., Lehmann J., Ramirez J., Hurtado M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions // *Biol. Fertil. Soils.* 2007. V. 43(6). P. 699–708.
 41. Pakhnenko O.A., Kurakov A.V., Kostina N.V., Umarov M.M. Production and reduction of nitrous oxide by microscopic soil fungi // *Eurasian Soil Science.* 1999. V. 32. № 2. P. 209–215.
 42. Schmidt M.W.I., Skemstad J.O., Gehrt E., Kögel-Knabner I. Charred organic carbon in German chernozemic soils // *Eur. J. Soil Sci.* 1999. V. 50. P. 351–365.
 43. Singh B.P., Hatton B.J., Singh B., Cowie A.L., Kathuria A. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils // *J. of Environmental Quality.* 2010. V. 39. № 4. P. 1224–1235.
 44. Sohi S.P., Lopez-Capel E., Bol R., Krull E. A review of biochar and its use and function in soil // *Advances in Agronomy.* 2010. V. 105. P. 47–82.
 45. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 3.0. Washington: US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, 1996. 693 p.
 46. Spokas K.A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O : C molar ratios // *Carbon Manag.* 2010. V. 1(2). P. 289–303.
 47. Steiner C. Slash and char as alternative to slash and burn: soil charcoal amendments maintain soil fertility and establish a carbon sink // *Cuvillier Verlag, Göttingen.* 2007. P. 218–230.
 48. Vaccari P.F., Baronti S., Lugatoa E., Genesio L., Castaldi S., Fornasier F. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat // *European J. of Agronomy.* 2011. V. 34. № 4. P. 231–238.
 49. Van Zwieten L., Bhupinderpal-Singh, Joseph S., Kimber S., Cowie A., Chan Y. Biochar reduces emissions of non-CO₂ GHG from soil. // *Biochar for environmental management* / Eds. Lehmann J., Joseph S. Earthscan Publications. Ltd. 2009. P. 227–249.
 50. Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Chan K. Y., Downie A., Rust J., Joseph S., Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility // *Plant Soil.* 2010. V. 327. P. 235–246
 51. Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Downie A., Berger E., Rust J., Scheer C. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol // *Austr. J. Soil. Res.* 2010. V. 48. P. 555–568.
 52. Verheijen F., Jeffery S., Bastos A.C., van der Velde M., Diafas I. Biochar application to soils, a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions EUR 24099 EN. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2009. 149 p.
 53. Wang J., Zhang M., Xiong Z., Liu P., Pan G. Effects of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from to paddy soils // *Biology and Fertility of Soils.* 2011. V. 47. P. 887–896.
 54. Woolf D. Biochar as a soil amendment: a review of the environmental implications. Swansea University, School of the Environment and Society. 2008 <http://orgprints.org/13268>.
 55. Wu X., Yao Z., Bruggemann N., Shen Z.Y., Wolf B., Dannenmann M., Zheng X., Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Soil Biol Biochem.* 2010. V. 42. P. 773–787.
 56. Yanai Y., Toyota K., Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2007. V. 53. P. 181–188.