



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 4 (38). Декабрь, 2020

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов

Редакционная коллегия

Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
А. М. Макаров
А. Ю. Мейгал
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов
A. Gugolek B.
J. B. Jakovlev
R. Krasnov
J. P. Kurhinen

Службы поддержки

А. А. Зорина
А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЕЙ ИЗ ИЛОВ СТОЧНЫХ ВОД НА РОСТ РАСТЕНИЙ, ПОЧВЕННЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ И СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ

РЯЗАНОВ
Станислав Сергеевич

к. б. н., Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), erylit@yandex.ru

КУЛАГИНА
Валентина Ивановна

к. б. н., Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), viksoil@mail.ru

ГРАЧЕВ
Андрей Николаевич

д. тех. н., Казанский национальный исследовательский технологический университет, energolesprom@gmail.com

СУНГАТУЛЛИНА
Люция Мансуровна

Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), sunlyc@yandex.ru

ЗАБЕЛКИН
Сергей Андреевич

к. тех. н., Казанский национальный исследовательский технологический университет, szabelkin@gmail.com

ШАГИДУЛЛИН
Рифгат Роальдович

д. хим. н., Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), shagidullin_@mail.ru

Ключевые слова:
биоуголь
биомасса и рост растений
группы микроорганизмов
температура пиролиза
илы сточных вод

Аннотация: Целью данного исследования было оценить воздействие биоугля, полученного из илов сточных вод при разной температуре пиролиза, на высоту и биомассу растений овса и горчицы, а также на микробиологические показатели серой лесной почвы. Биоуголь был получен на установке быстрого пиролиза FPP02 при температуре 300 + 20 °С и 500 + 20 °С. При проведении лабораторного вегетационного опыта в почву вносили 2 %, 5 % и 10 % биоугля от веса почвы. Растения выращивались в течение 42 дней. Высота и биомасса растений горчицы белой увеличились по сравнению с контролем при добавлении 2 % и 5 % биоугля, полученного при 500 °С, и 2 % биоугля, полученного при 300 °С. При внесении в почву 10 % трехсотградусного биоугля продуктивность овса и горчицы снижалась по сравнению с контролем. Внесение биоугля из илов сточных вод способствовало увеличению

содержания валового азота в почве. Численность большинства трофических групп микроорганизмов при внесении в почву биоугля из илов сточных вод возрастала, причем более значительно – при внесении трехсотградусного биоугля. Наибольшая корреляция между концентрацией трехсотградусного биоугля и численностью микроорганизмов наблюдалась для микроскопических грибов, наименьшая – для группы педотрофных микроорганизмов.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Н. П. Бучкина

Рецензент: Е. А. Жарикова

Получена: 03 Февраля 2020 года

Подписана к печати: 26 декабря 2020 года

Введение

Проблема утилизации осадков сточных вод стоит остро во всем мире, в том числе в России. Ориентировочно в Российской Федерации ежегодно производится 2.6 млн т. таких осадков в пересчете на сухое вещество (Плеханова, 2017). Невозможно бесконечно увеличивать площадь полигонов для складирования илов сточных вод, тем более что подобные отстойники являются источником экологических, экономических и социальных проблем. Все это заставляет искать пути безопасного применения и утилизации иловых осадков сточных вод (Кулагина и др., 2018а). Илы сточных вод часто рассматриваются как возможный источник питательных веществ для агроценозов, т. к. они содержат большое количество азота, фосфора, микроэлементов, органических веществ. Однако при внесении в почву необработанных осадков сточных вод существует опасность загрязнения почв и грунтовых вод тяжелыми металлами, патогенной микрофлорой, яйцами гельминтов, дурно пахнущими веществами, которые имеются в составе илов (Рэуце, Кырстя, 1986; Буренков и др., 2016).

Существуют разные методы переработки илов сточных вод: сжигание до золы, компостирование и др. Сжигание до минеральных веществ вносит свой вклад в увеличение содержания парниковых газов в атмосфере и загрязнение воздушного бассейна. Поэтому все более перспективной считается переработка органических отходов в биоуголь путем пиролиза с последующим внесением биоугля в почву (Грачев и др., 2013). При пиролизе илов сточных вод происходит их термическая стерилизация. Полученный таким образом биоуголь обеззаражен и не содержит патогенных микроорганизмов. Биоуголь разлагается очень медленно, не вызывая существенной эмиссии CO_2 в атмосферу. По данным многих исследователей, внесение биоугля в почву способствует уменьшению

эмиссии из почвы и другого парникового газа – закиси азота (Рижия и др., 2015; Krishnakumar et al., 2014; Lehman et al., 2003). Но не все так однозначно. Если биоуголь из остатков древесины в некоторых странах уже разрешается применять даже в органическом земледелии (Major, 2010), то биоуголь из илов сточных вод не считается настолько безопасным. Высокая концентрация тяжелых металлов является существенным препятствием, ограничивающим применение биоугля из илов сточных вод в сельском хозяйстве, хотя многие исследования показывают «капсуляцию» и уменьшение растворимости и доступности тяжелых металлов растениям при определенных режимах термической обработки (Рязанов и др., 2018; Song et al., 2014; Liu et al., 2014; Waqas et al., 2013).

Используя эколого-биологические показатели, основанные на реакции живых организмов (растений и почвенных микроорганизмов) на условия окружающей среды, можно дать интегральную оценку положительного или отрицательного влияния биоугля на свойства почв. Из-за непостоянства состава самих биоуглей, зависящих от исходного сырья и режима термической обработки, разнообразия почв и отличий в потребностях сельскохозяйственных культур, результаты множества проведенных исследований весьма противоречивы.

По данным Song с соавт. (2014), биоуголь из илов сточных вод способствовал увеличению урожайности чеснока. Особенно благоприятное воздействие на растения оказал биоуголь, полученный при температуре 450 °С. Соотношение биоуголь : почва было достаточно высоким – 1 : 4. При этом чеснок, посаженный в почву с добавлением этого вида биоугля, содержал самый низкий уровень тяжелых металлов по сравнению с вариантами опыта, в которых использовался биоуголь, полученный при температуре 400, 500 и 550 °С.

По данным Ábrego с соавт. (2015), изучавших последствия внесения в почву биоугля из илов сточных вод мадридской очистной станции, при дозе биоугля 20т/га произошло уменьшение биомассы растений кукурузы на 50 % независимо от температуры получения биоугля. Авторы не выявили конкретную причину снижения биомассы, но предположили, что это может быть связано с выщелачиванием тяжелых металлов и органических соединений, а также с выделением токсичных летучих соединений из биоугля.

Исследования Liu с соавт. (2014) показали, что применение биоугля из осадка сточных вод на бесплодных и загрязненных тяжелыми металлами почвах способствовало росту растений и увеличению биомассы пекинской капусты.

Несмотря на то что исследования по применению биоугля в земледелии ведутся во многих странах, в настоящее время накоплено недостаточно информации, чтобы дать однозначный ответ о влиянии биоугля на свойства почв, а впоследствии разработать общие рекомендации по дозам внесения биоугля в почвы разных типов. Важным моментом является разработка таких норм, доз и методик внесения биоугля, которые не оказывали бы негативного воздействия

на почвы и растения, а способствовали улучшению эколого-биологического состояния почв.

Целью данного исследования была оценка воздействия биоуглей из илов сточных вод, полученных при температуре 300 + 20 °С и 500 + 20 °С, в сравнении с биоуглями, полученными из древесины березы, в разных концентрациях при внесении их в почву на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели серых лесных почв.

Материалы

Объектом исследования являлся биоуголь, полученный с применением установки быстрого пиролиза FPP02, которая является запатентованной разработкой компании ООО «Энерголеспром» г. Казань (Патент..., 2009). Производственный комплекс FPP02 предназначен для термохимической переработки и утилизации биомассы и других органических полимерных отходов с получением жидких органических продуктов и мелкодисперсного угля.

Переработка иловых осадков осуществлялась в диапазоне температур 300 ± 20 °С и 500 ± 50 °С. Состав продуктов переработки иловых осадков и древесных отходов при 500 °С представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав продуктов переработки, полученных при пиролизе илов сточных вод и древесных отходов на установке FPP02 при 500 ± 20 °С

Продукт	Иловые осадки	Древесные отходы
Биоуголь	28.57 %	21.46 %
Жидкие продукты	37.30 %	48.98 %
в т. ч. смола	22.38 %	22.04 %
Газ	34.13 %	29.56 %

Твердым продуктом пиролиза является углистый остаток, в данном случае представляющий собой мелкодисперсный черный порошок. Для определения его свойств

были проведены исследования согласно ГОСТ Р 53357-2013. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Свойства биоуглей, полученных при пиролизе илов сточных вод и древесных отходов при температуре 500 ± 20 °С

Свойство	Единицы	Биоуголь из иловых осадков	Биоуголь из древесных остатков
Зольность	%	19.3	2.4
Содержание летучих веществ	%	12.0	25.5
Содержание нелетучего углерода	%	68.7	72.1
Высшая теплота сгорания	кДж/кг	25335	31123

Изучались три вида биоугля: 1) биоуголь из илов сточных вод, полученный при температуре 300 ± 20 °C (SB300); 2) биоуголь из илов сточных вод, полученный при температуре 500 ± 20 °C (SB500); 3) древесный биоуголь из березовых опилок, пиролизированный при температуре 500 ± 20 °C (WB500). Древесный биоуголь использовался в качестве контроля для сравнения биоуглей из осадков сточных вод с экологически чистым и безопасным биоуглем.

Методы

Дизайн эксперимента

Почва для вегетационного эксперимента была отобрана из пахотного горизонта на территории Верхнеуслонского района Республики Татарстан. Согласно классификации почв СССР 1977 г., почва определена как серая лесная. Согласно международной классификации почв – Harpic LUVISOL (World Reference Base..., 2015). Содержание гумуса в почве составляло 4.3 %, рН солевой вытяж-

ки (1N KCl в 1 : 2.5 пропорции по весу) – 5.6. Перед опытом почва была высушена, растерта и просеяна через сито с отверстиями 1 мм.

В вегетационные сосуды помещалось по 400 г смеси почвы и биоугля с содержанием биоугля 2 %, 5 % и 10 % по весу. В качестве контроля использовалась почва без биоугля. В одну половину вегетационных сосудов были высажены семена горчицы белой (*Sinápis álba* L.) по 20 шт. на сосуд, во вторую половину – овса посевного (*Avéna satíva* L.) по 12 шт. на сосуд. После высаживания растений сосуды содержались в вегетационной камере с контролируемой температурой и освещением. Влажность почвы в сосудах поддерживалась на уровне 60 % от полной влагоемкости. Эксперимент был проведен в тройной повторности, что в сумме составило 54 вегетационных сосуда, плюс 6 контрольных сосудов без биоугля (3 с овсом и 3 с горчицей белой) (рис. 1).

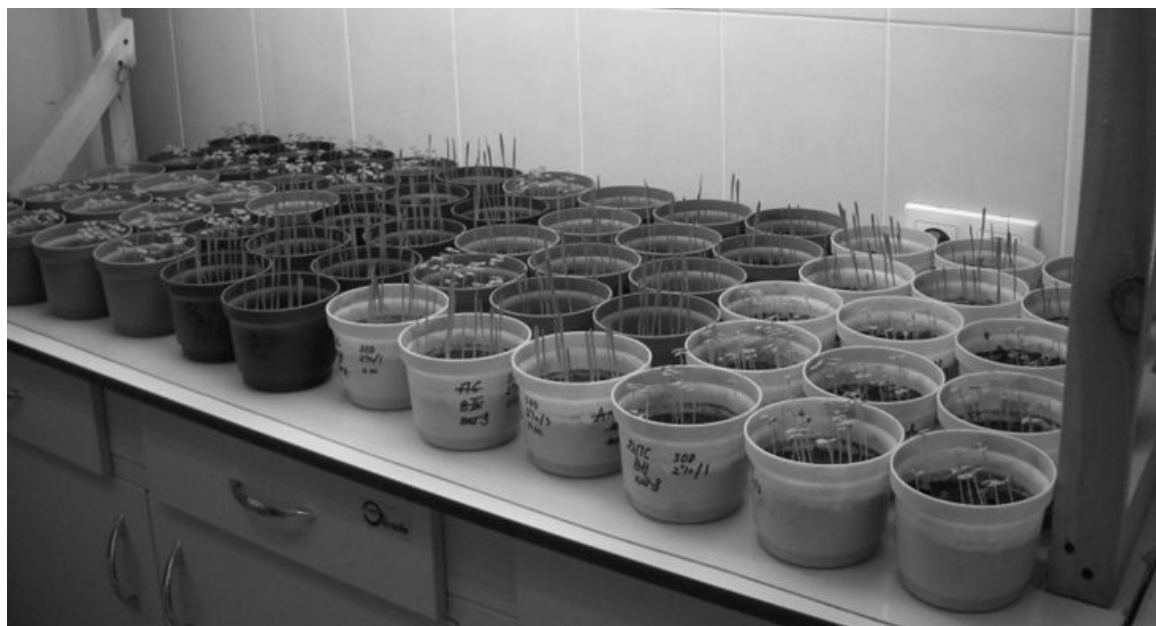


Рис. 1. Вегетационные сосуды с овсом (*Avéna satíva* L.) и горчицей (*Sinápis álba* L.) на 7-й день после посева

Fig. 1. Experimental pots with oat (*Avéna satíva* L.) and white mustard (*Sinápis álba* L.) plants on the 7th day after sowing

Овес посевной и горчица белая были выбраны в качестве тест-объектов, т. к. оба они являются сельскохозяйственными культурами, используемыми в Республике Татарстан. Кроме того, исследования целесообразно проверить как на однодольных, так и двудольных растениях.

Проводили измерения высоты растений и рассчитывали среднюю высоту растений в

каждом сосуде 8 раз, сначала каждый день с момента появления всходов, затем интервал увеличивался. На 14-й день половина растений была срезана для определения сухой биомассы. Оставшиеся растения выращивались до 42-го дня, после чего опыт был завершен. Растения были срезаны, для них также была измерена высота и определена сухая биомасса

Почвенные микроорганизмы и почвенные свойства

На 42-й день опыта из сосудов были отобраны образцы для определения микробиологической деятельности. Для оценки численности культивируемых групп микроорганизмов были использованы стандартные методы посева на плотных питательных средах (Теппер и др., 1993):

– мясопептонный агар – для оценки общего микробного числа;

– крахмало-аммиачный агар – для определения числа амилолитических бактерий, утилизирующих минеральный азот, и актиномицетов;

– среда Чапека – для определения числа микроскопических грибов;

– почвенный агар – для культивирования педотрофов.

Численность групп микроорганизмов выражена в колониеобразующих единицах на грамм почвы (КОЕ/г). Направленность микробиологических процессов в почве определяли по коэффициенту минерализации-иммобилизации, рассчитанному как соотношение микроорганизмов-амилолитиков к общему микробному числу (Мишустин, 1956).

Содержание валового азота в почвенных образцах определяли колориметрически после разложения смесью серной и хлорной кислот (Мещеряков, 1963; Аринушкина, 1970).

Результаты

Влияние биоугля на массу растений

Установлено, что воздействие исследованных биоуглей на рост и развитие растений было различным на 14-й и 42-й день опыта. Также были установлены различия между овсом и горчицей по их реакции на внесение биоугля.

Средняя сухая масса одного растения овса на 14-й день опыта в большинстве вариантов не отличалась от контроля (рис. 2а). Исключение составлял только вариант SB500 с дозой внесения биоугля 2 %, оказавший статистически значимое воздействие на увеличение этого показателя.

На 42-й день опыта статистически достоверного воздействия древесного биоугля на среднюю сухую массу одного растения овса не наблюдалось, кроме варианта с 10 % биоугля (рис. 2б), где масса снижалась. Наблюдалась слабая тенденция к увеличению массы одного растения овса на вариантах опыта с внесением 2 % биоугля из илов сточных вод, но она была статистически недостоверна из-за большого различия в полученных данных и высокого стандартного отклонения. С увеличением концентрации любого из исследованных биоуглей до 10 % средняя масса растения овса снижалась. Самая низкая масса наблюдалась при внесении в почву 10 % биоугля SB300. Этот вариант статистически значимо отличается от контроля.

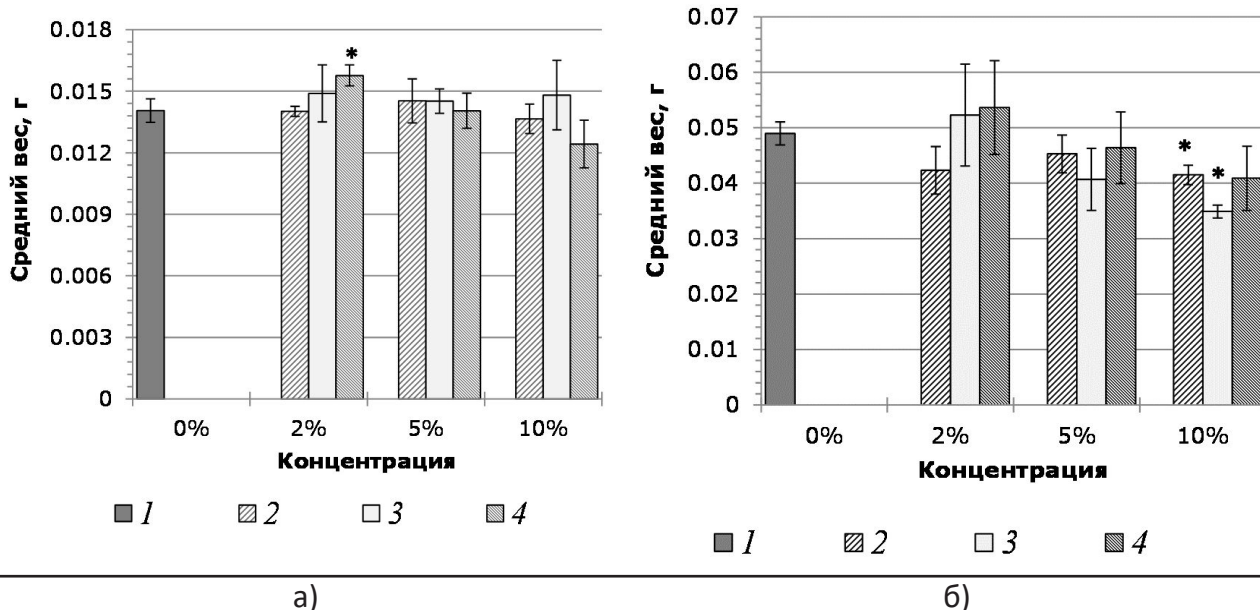


Рис. 2. Средняя сухая масса одного растения овса (*Avena sativa* L.): а) на 14-й день; б) на 42-й день со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. 1 – контроль; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Fig. 2 Average dry mass of a single oat plant (*Avena sativa* L.): a) on the 14th day of the experiment; b) on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. 1 – control; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Горчица белая была более чувствительна к внесению биоугля, чем овес. На 14-й день опыта самый высокий стимулирующий эффект на среднюю сухую массу растения горчицы наблюдался при внесении древесного биоугля (рис. 3а). Как показала статистическая обработка результатов, биомасса одного растения на варианте с 2 % WB500 была достоверно выше, чем на контроле. Для остальных вариантов концентрации WB500 также наблюдалась тенденция к увеличению средней сухой массы растения горчицы, но эта разница не была статистически значимой.

Биоуголь SB300 не оказал статистически значимого влияния на среднюю массу растения горчицы на 14-й день опыта при изучаемых вариантах концентрации. Биоуголь SB500 в дозе 2 % и 5 % от веса почвы не оказал статистически значимого воздействия на среднюю массу растения горчицы на 14-й день опыта, а в концентрации 10 % вызывал

снижение средней массы растения горчицы примерно в три раза (см. рис. 3а).

Однако снижение средней массы растения при добавлении SB500 было временным, и на 42-й день опыта именно для биоугля SB500 средняя масса растения горчицы увеличилась наиболее существенно (рис. 3б). При концентрации SB500 10 % средняя масса растения горчицы оказалась выше, чем для двух других видов биоугля, хотя наибольшая стимуляция развития биомассы растений наблюдалась при внесении SB500 в концентрациях 5 % и 2% от веса почвы. Влияние WB500 на среднюю массу растения горчицы на 42-й день опыта не было отмечено, все варианты с внесением древесного биоугля не отличались от контроля. Наибольшую прибавку массы можно наблюдать при внесении SB300 в концентрации 2 % от веса почвы. Средняя масса одного растения горчицы возросла по сравнению с контролем почти в два раза.

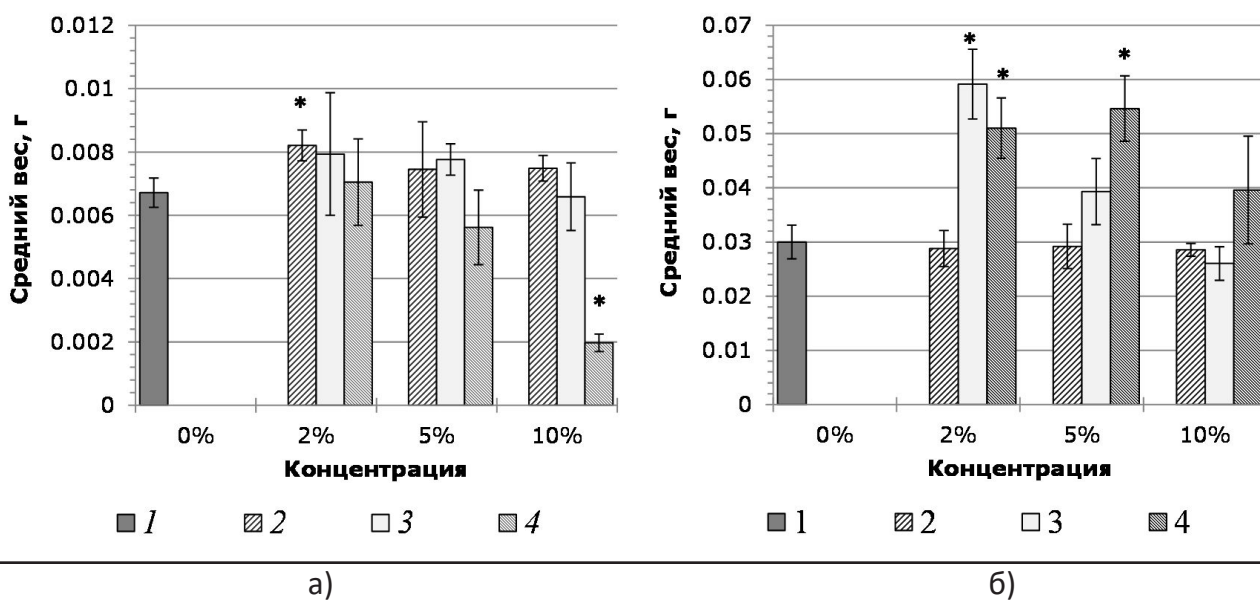


Рис. 3. Средняя сухая масса одного растения горчицы белой (*Sinapis alba* L.): а) на 14-й день; б) на 42-й день со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. 1 – контроль; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Fig. 3. Average dry mass of a single white mustard plant (*Sinapis alba* L.): a) on the 14th day of the experiment; b) on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. 1 – control; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Влияние биоугля на высоту растений

На рис. 4 показано изменение высоты растений горчицы с 4-го по 42-й день опыта при внесении SB300 и SB500 в разных дозах. В обоих случаях растения в вариантах с 10 % биоугля отстают в росте от контроля и большинства других вариантов. Однако на 42-й день опыта высота растений в вариантах опыта с внесением SB500 в концентрации 2 % и 5 % была значительно выше контроля.

Для биоугля SB300 стимулирующий эффект был отмечен только при концентрации 2 %.

По показателю высоты растений овес посевной оказался менее чувствителен к внесению биоугля, чем горчица. Высота растений на 42-й день при внесении SB300 и SB500 статистически значимо не отличалась от контроля (рис. 5). На графиках прослеживается тенденция к уменьшению высоты растений овса при внесении 10 % биоугля из илов сточных вод, но она статистически недостоверна.

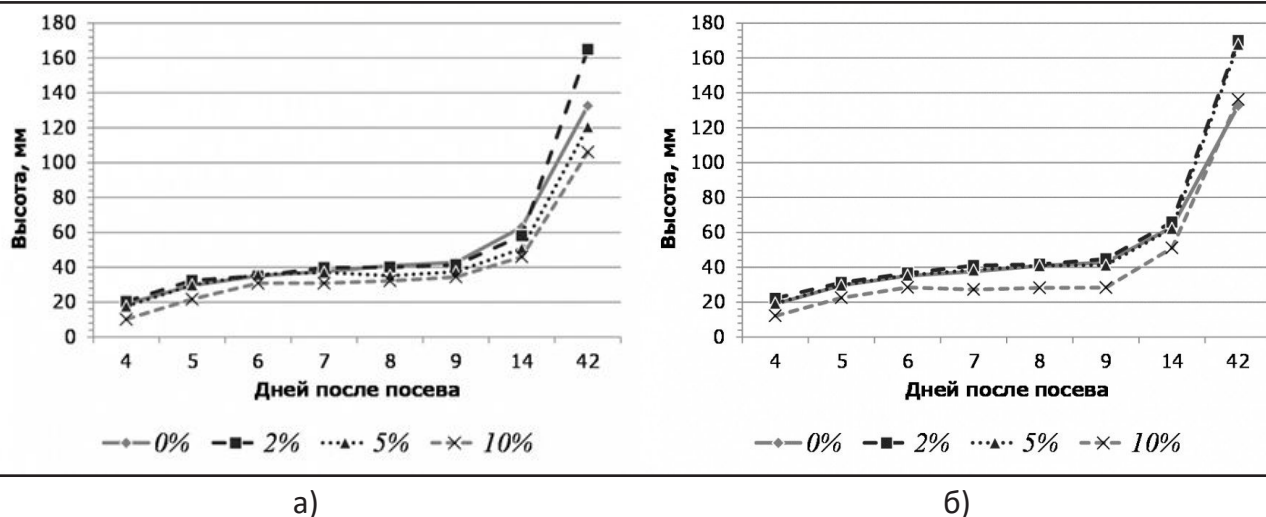


Рис. 4. Динамика высоты растений горчицы (*Sinápis álba* L.) в период с 4-го по 42-й день эксперимента при внесении различных доз биоугля из илов сточных вод: а) SB300; б) SB500

Fig. 4. Dynamics of white mustard (*Sinápis álba* L.) height during the period from 4th to 42nd day when applying different doses of biochar from sewage sludge : а) SB300; б) SB500

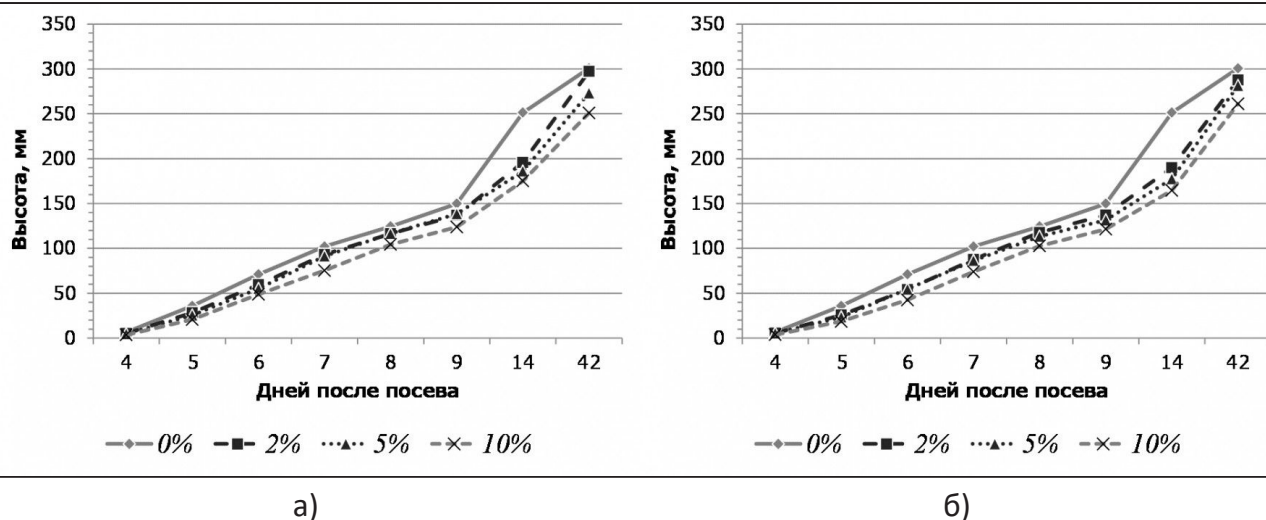


Рис. 5. Динамика высоты растений овса (*Avéna satíva* L.) в период с 4-го по 42-й день эксперимента при внесении различных доз биоугля из илов сточных вод: а) SB300; б) SB500

Fig. 5. Dynamics of oat (*Avéna satíva* L.) height during the period from 4th to 42nd day when applying different doses of biochar from sewage sludge : а) SB300; б) SB500

В вариантах опыта с внесением древесного биоугля высота растений горчицы и овса не отличалась от контрольных вариантов (данные не приводятся).

Содержание общего азота в почве

Внесение биоугля из илов сточных вод (как SB300, так и SB500) в почву приводит к статистически значимому по сравнению с контролем увеличению содержания в почве общего азота, что не наблюдается при внесении в почву древесного биоугля (рис. 6).

Микробиологические показатели

Согласно полученным данным, общее микробное число увеличивалось с ростом концентрации биоугля из илов сточных вод

(рис. 7). При внесении SB300 максимальная микробиологическая деятельность под посевами горчицы наблюдалась при концентрации угля 5 %, но и разброс данных на этом варианте опыта тоже был самый большой, поэтому разница с контролем была статистически недостоверна. Максимальное абсолютное значение общего микробного числа наблюдалось под посевами овса при внесении 10 % SB300, оно превышало аналогичный показатель в почве без биоугля почти в 20 раз. Статистически значимая разница с контролем наблюдается при внесении 10 % SB300 и SB500 в почву под обе культуры, а также при внесении 5 % SB500 под овес.

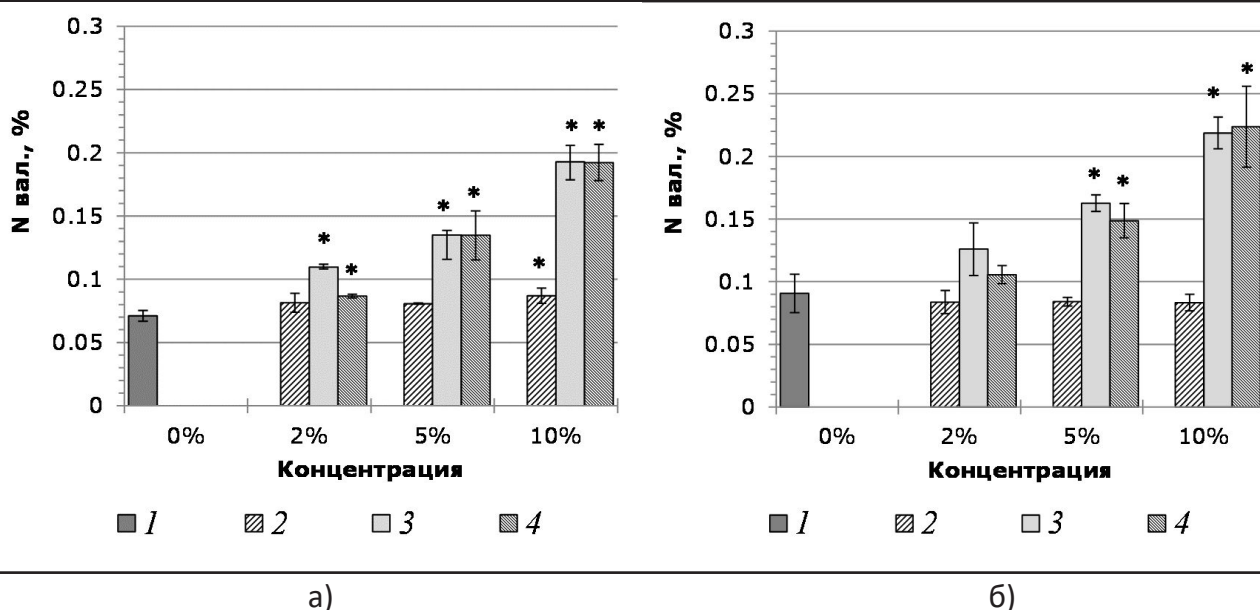


Рис. 6. Валовое содержание азота в почве на 42-й день опыта со стандартными отклонениями: а) горчица (*Sinapis alba* L.); б) овес (*Avena sativa* L.). Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. 1 – контроль; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Fig. 6. Total nitrogen content in soil on the 42nd day of the experiment with standard deviations: a) white mustard (*Sinapis alba* L.); b) oat (*Avena sativa* L.). Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. 1 – control; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

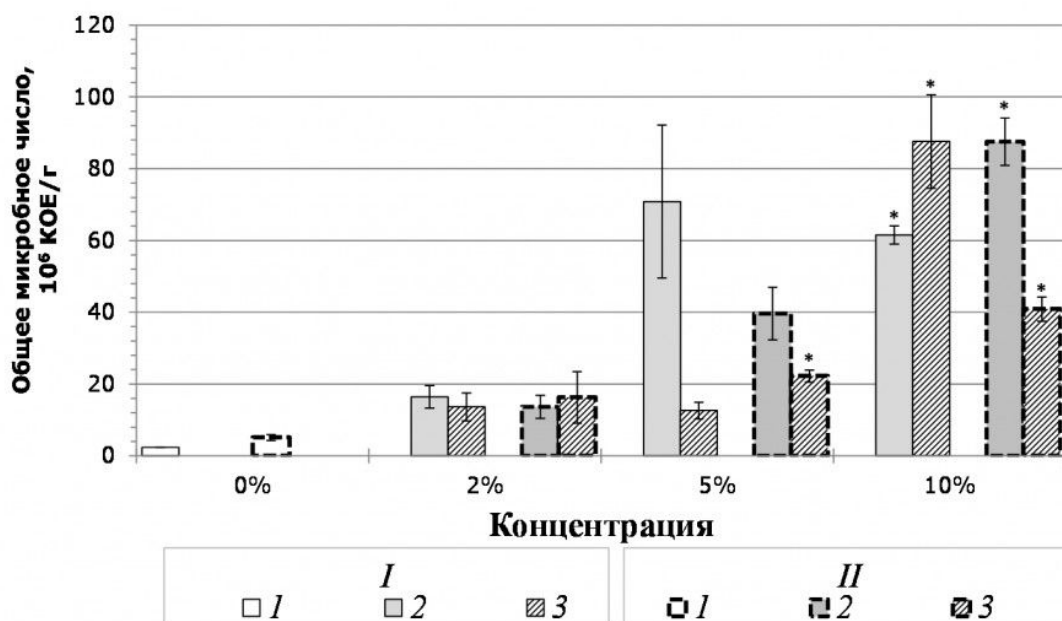


Рис. 7. Общее микробное число на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 7. Total microbial number on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

Внесение SB300 и SB500 вызывает увеличение численности амилотических микроорганизмов, потребляющих минеральные формы азота (посев на крахмал-аммиачном агаре) по сравнению с контролем (рис. 8). Коэффициент корреляции между концен-

трацией биоугля и численностью амилотических микроорганизмов колебался от 0.54 до 0.88 в зависимости от вида биоугля и выращиваемой культуры (коэффициент корреляции Пирсона при $p < 0.05$). Заметный всплеск численности амилотических ми-

кроорганизмов наблюдался под посевами горчицы при внесении SB300 в количестве 5 % и 10 % (см. рис. 8). В остальных вариантах численность амилолитических микроорганизмов была более чем в два раза ниже.

Хотя статистически значимая разница с контролем наблюдалась не только при внесении SB300 в количестве 5 % и 10 %, но и для других вариантов опыта.

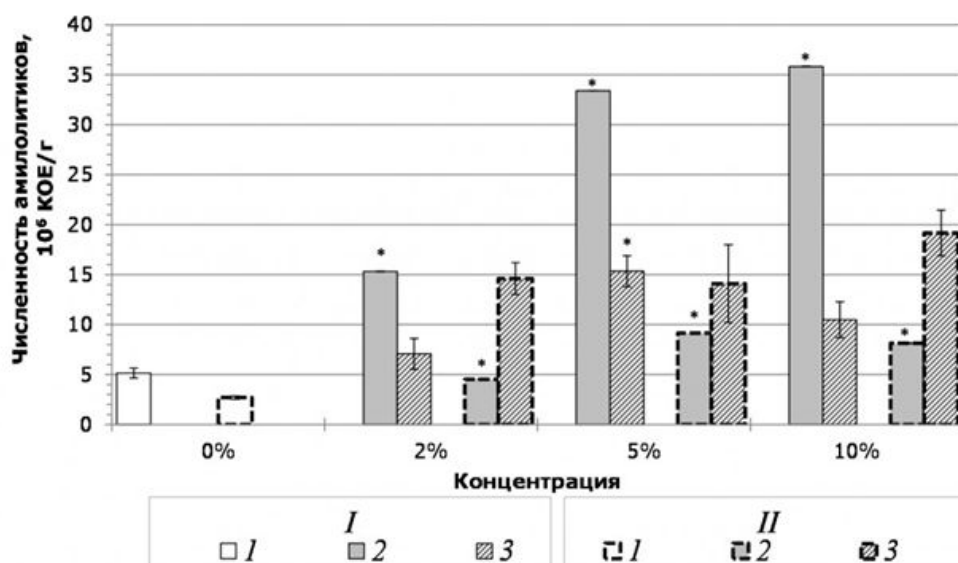


Рис. 8. Численность амилолитических бактерий на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 8. Number of amylolytic bacteria on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

При внесении в почву биоугля из илов сточных вод численность микромицетов увеличивалась (рис. 9). Коэффициент корреляции между дозой внесения биоугля и численностью микромицетов колебался от 0.82 до 0.99 (коэффициент корреляции Пирсона

при $p < 0.05$) под разными культурами, что говорит о средней и высокой степени зависимости между этими показателями. Статистически значимая разница между вариантами с добавлением биоугля и контролем чаще наблюдалась для SB300.

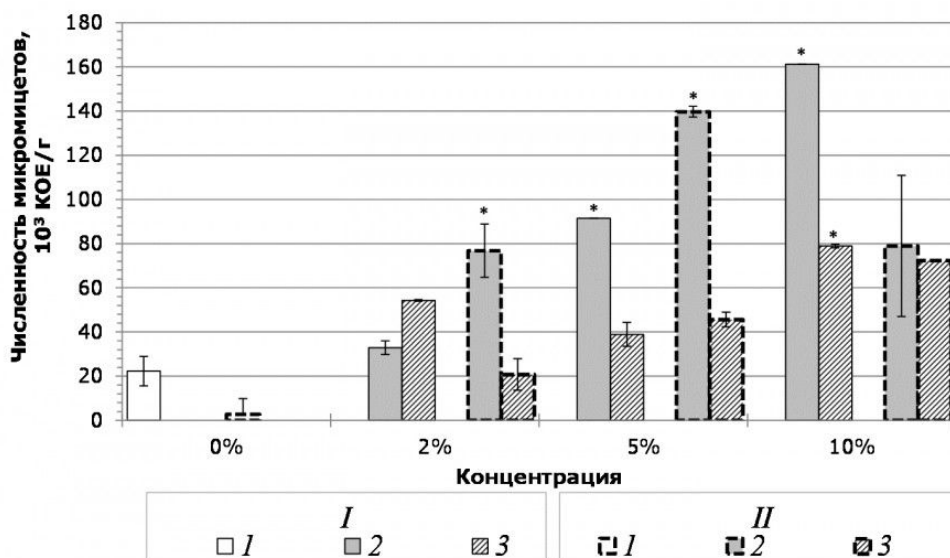


Рис. 9. Численность микромицетов на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 9. Number of micromycetes on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

Педотрофы, т. е. микроорганизмы, способные разлагать лабильное органическое вещество, выращенные на почвенном агаре, также показали всплеск численности на вариантах с SB300, однако максимум все же пришелся на низкие концентрации биоугля

(рис. 10). Все варианты с внесением SB300 статистически значимо отличались от контроля, при внесении в почву SB500 статистически значимые отличия наблюдались при больших концентрациях.

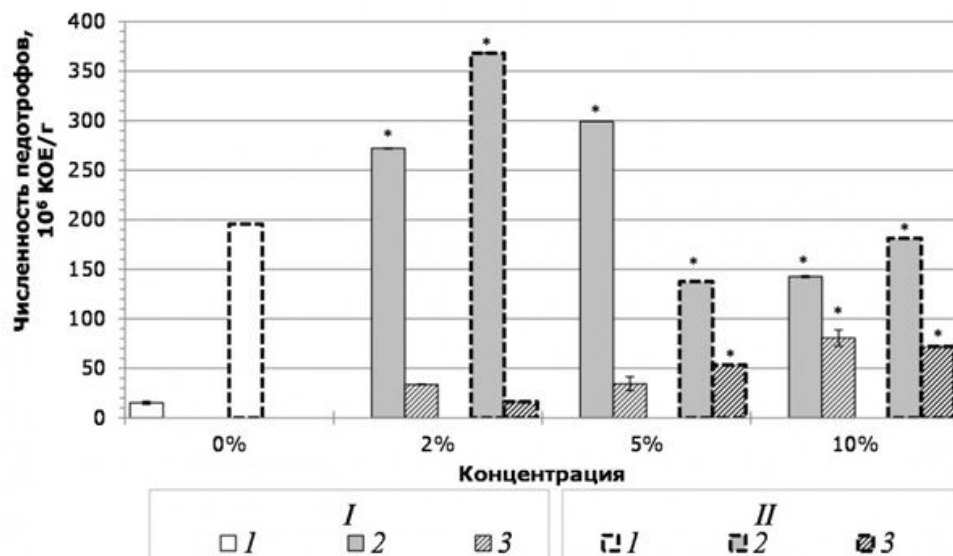


Рис. 10. Численность педотрофов на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 10. Number of soil microorganisms on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

Интересно, что наблюдается высокая степень зависимости между концентрацией SB500 и численностью педотрофов (коэффициент корреляции равен 0.95–0.98) и не наблюдается зависимости между концентрацией SB300 и численностью педотрофов (коэффициент корреляции Пирсона равен 0.04–0.17 при $p < 0.05$).

Коэффициент минерализации и иммобилизации по Е. Н. Мишустину (1956) даже без внесения биоугля под горчицей и овсом отличался в 4 раза (рис. 11). При внесении биоугля в почву под горчицей коэффициент уменьшился, под овсом статистически значимых изменений не произошло.

Обсуждение

Биоуголь из древесных остатков считается экологически и биологически чистым и безопасным почвенным мелиорантом (Major, 2010). Наши результаты не противостоят литературным данным, и WB500 не показал какого-либо значительного отрицательного воздействия на биомассу и рост растений, кроме растений овса при концентрации биоугля 10 %. В то же время стимулирование роста растений было довольно

кратковременным, и на 42-й день опыта уже не наблюдалось. Отсутствие отклика растений на добавление древесного биоугля без дополнительных азотных удобрений также отмечалось ранее (Chan et al., 2007).

Вследствие более высокой зольности и, как следствие, большего содержания как полезных, так и вредных веществ уголь из осадков сточных вод показал более разнобразное воздействие на исследованные параметры. Две различные культуры, овес посевной и горчица белая, по-разному реагировали на добавление биоугля из осадков сточных вод в почву.

Растения овса оказались менее чувствительны к внесению биоугля из осадков сточных вод в почву. Стимулирующий эффект на высоту и биомассу растений, наблюдавшийся на 14-й день эксперимента, стал незначимым к 42-у дню. Внесение биоугля в концентрации 2 % и 5 % не привело к значимым различиям в массе и высоте растений овса, и только 10 % SB300 вызвало значительное снижение этих параметров. Ábrego с соавт. (2015) также отметили снижение развития растений кукурузы при слишком больших концентрациях биоугля из осадков сточных

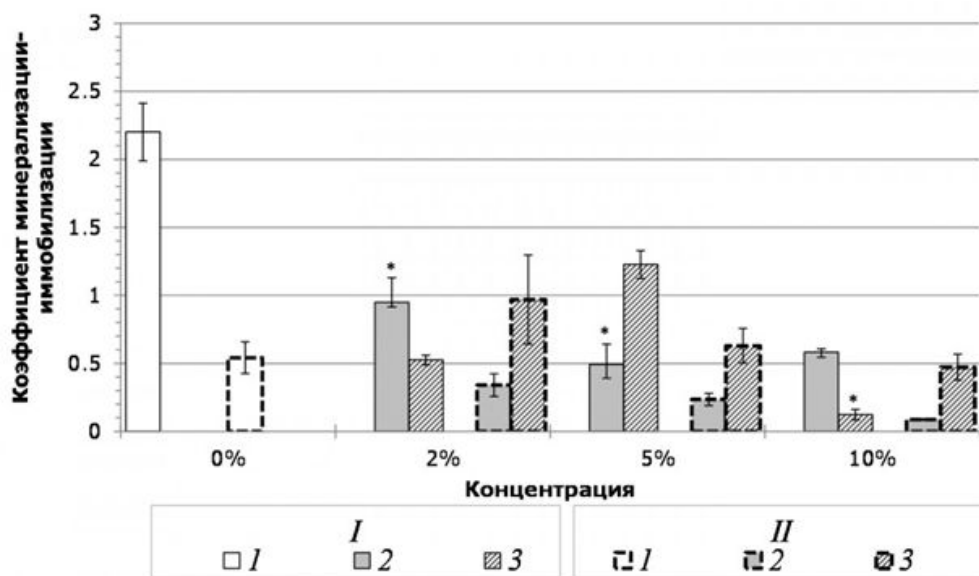


Рис. 11. Коэффициент минерализации-иммобилизации на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinápis álba* L.); II – овес посевной (*Avéna satíva* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500
 Fig. 11. Coefficient of nitrogen mineralization-immobilization on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinápis álba* L.); II – oat (*Avéna satíva* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

вод. Что в свою очередь указывает на высокое содержание в биоугле из осадков сточных вод веществ, угнетающих развитие растений (Ábrego et al., 2015).

Горчица белая оказалась более чувствительной к добавлению биоугля. Стимуляция биомассы и высоты растений наблюдалась в вариантах с добавлением 2 % SB300 и 2–5 % SB500. Увеличение концентрации SB300 до 10 % привело к угнетению роста горчицы. Положительный эффект SB300 наблюдался при более низких концентрациях в сравнении с SB500, что может свидетельствовать о более высокой токсичности биоугля, полученного при 300 °C (Song et al., 2014).

Статистически значимое увеличение содержания валового азота в почве наблюдается только при внесении биоугля из илов сточных вод. Внесение древесного биоугля не приводит к увеличению содержания азота в почве (рис. 6). Вероятно, это связано с тем, что биоуголь из илов сточных вод содержит больше азота, чем почва и древесный биоуголь. Исследуемая почва содержит 0.075 % валового азота, березовый биоуголь – 0.27 %, биоуголь SB500 – 1.46 %, SB300 – 1.02 %. Таким образом, с SB500 и SB300 в почву вносится дополнительно больше азота.

Несмотря на увеличение содержания общего азота в почве при добавлении биоуглей из осадков сточных вод, не наблюдалось прямой зависимости между содержанием азота и биомассой и высотой растений.

Численность различных трофических групп микроорганизмов в большинстве случаев повышалась с увеличением концентрации биоуглей. Это согласуется с ранее полученными данными. Считается, что внесение в почву биоугля способствует развитию микроорганизмов благодаря дополнительным питательным веществам, оптимизации реакции среды и пористой структуре (Krishnakumar et. al., 2014; Singh et. al., 2010; Van Zwieten et. al., 2010).

Корреляция между количеством микроорганизмов, способных потреблять минеральный и органический азот, и концентрациями биоугля из осадков сточных вод была прямой и довольно высокой. Наибольшая численность этих двух групп микроорганизмов наблюдалась при добавлении SB300 под растения белой горчицы. Микробиологические показатели в вариантах с древесным биоуглем нами не определялись, т. к. были изучены ранее (Григорьян и др., 2016; Кулагина и др., 2018б). Результаты предыдущих исследований показали, что внесение древесного биоугля в ту же серую лесную почву в концентрациях 2–10 % не влияет на численность аммонификаторов, а максимальная численность амилотических бактерий наблюдалась при внесении 10 % древесного биоугля в почву (Кулагина и др., 2018б). Таким образом, биоуголь из илов сточных вод больше способствовал развитию в почве аммонифицирующих микроорганизмов, чем

древесный биоуголь.

Наиболее сильная зависимость между концентрациями SB300 и SB500 и численностью микроорганизмов наблюдалась для микромицетов, и наименьшая – для педотрофных бактерий.

Микроскопические грибы являются неотъемлемой частью почвенной микробиоты. Они принимают участие в разложении органических веществ, в том числе таких сложных соединений, как целлюлоза и лигнин (Емцев, Мишустин, 2008). Микромицеты активно участвуют в разложении органических остатков, синтезе и минерализации гумуса, освобождении элементов корневого питания растений, в круговороте азота (Шляужене, 1983; Gadd, 2017). Численность микромицетов была в два раза выше при добавлении SB300 в сравнении с SB500. Вероятная причина этого в том, что SB300 содержит больше органического вещества, пригодного для микромицетов, в связи с более низкими температурами в процессе пиролиза.

Количество педотрофов, способных разлагать лабильное органическое вещество, увеличивалось с добавлением биоугля из осадков сточных вод. При внесении SB500 численность возрастала не более чем в 3–4 раза по сравнению с контролем, но четко коррелировала с дозой вносимого биоугля.

В случае SB300 численность возрастала по сравнению с контролем в 10–15 раз, но корреляции с дозой вносимого биоугля не имела.

Причина, по-видимому, также в количестве вносимого с SB500 и SB300 лабильного органического вещества, пригодного для использования педотрофными микроорганизмами. В SB300 такого вещества было больше. Однако при высоких концентрациях SB300 сильнее начинают проявляться другие характеристики. Например, более высокое содержание доступных токсичных веществ.

Коэффициент минерализации и иммобилизации под горчицей без внесения биоугля был больше единицы, что свидетельствует о преобладании процессов иммобилизации азота. В то же время под посевами овса без внесения биоугля явно преобладали про-

цессы минерализации. То есть потребление азота данными растениями и состав их корневых выделений очень сильно отличаются. При внесении биоугля коэффициент минерализации только на одном варианте опыта оказался больше единицы (5 % SB500 под горчицей). Во всех остальных случаях процессы минерализации явно преобладали. По-видимому, причина все в том же – с биоуглем в почву попадает большое количество пригодного к разложению микроорганизмами лабильного органического вещества и общего азота. Этот результат значительно отличается от ранее полученных данных для WB500. Для древесного биоугля коэффициент минерализации-иммобилизации показал сдвиг от доминирования процессов минерализации в начале эксперимента к доминированию иммобилизации на 42-й день после посева растений (Кулагина и др., 2018б). Разница объясняется соотношением C/N, которое в древесном биоугле шире, чем в SB500 и SB300.

Заключение

Увеличение высоты и биомассы растений при внесении SB300 в почву проявляется при более низких концентрациях в сравнении с SB500. Эта зависимость, по-видимому, связана с меньшей токсичностью продуктов пиролиза, получаемых при более высоких температурах. Между тем стоит отметить, что не наблюдается значимой корреляции между валовым содержанием азота в смеси почвы и биоугля и развитием тестовых растений. Также отсутствует прямая зависимость между параметрами развития растений и почвенной микробиологической активностью. Добавление биоугля из осадков сточных вод в большинстве случаев сдвигает баланс микробиологической активности в сторону процессов минерализации азота.

Таким образом, результаты указывают, что стимуляция роста растений может быть достигнута при добавлении не более чем 5 % биоугля из осадков сточных вод. Эффект от добавления биоугля сильнее для горчицы белой, чем для овса. Как дополнительный эффект – биоуголь способствует усилению микробиологической активности.

Библиография

- Аринюшкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв . М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
Буренков С. В., Грачев А. Н., Забелкин С. А. Термическая утилизация иловых осадков сточных вод методом быстрого пиролиза в сеточном реакторе // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 22. С. 40–43.
ГОСТ Р 53357-2013. Топливо твердое минеральное. Технический анализ . URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55375/> (дата обращения: 12.05.2020).

- Грачев А. Н., Макаров А. А., Забелкин С. А., Башкиров В. Н. Термохимическая переработка лигноцеллюлозного сырья в биотопливо и химические продукты // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 21. С. 109–111.
- Григорьян Б. Р., Грачев А. Н., Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Кольцова Т. Г., Рязанов С. С. Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 11. С. 185–189.
- Емцев В. Т., Мишустин Е. Н. Микробиология. М.: Дрофа, 2008. 444 с.
- Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.
- Кулагина В. И., Грачев А. Н., Рязанов С. С., Кольцова Т. Г., Сунгатуллина Л. М., Рупова Э. Х. Оценка фитотоксичности как первый этап эколого-биологической оценки влияния продукта пиролиза илов сточных вод на почвы // Вестник технологического университета. 2018а. Т. 21. № 1. С. 164–168.
- Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Грачев А. Н., Шагидуллин Р. Р., Рязанов С. С., Забелкин С. А., Кольцова Т. Г. Оценка воздействия биоугля на микробиологические и некоторые физико-химические показатели серой лесной почвы // Российский журнал прикладной экологии. 2018б. № 2 (14). С. 21–25.
- Мещеряков А. М. Разложение почв серной и хлорной кислотами для определения азота и фосфора // Почвоведение. 1963. № 5. С. 21–30.
- Мишустин Е. Н. Микроорганизмы и плодородие почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 342 с.
- Патент 2395559 Рос. Федерация. Способ термической переработки органосодержащего сырья. 2009 / А. Н. Грачев, В. Н. Башкиров, С. А. Забелкин, А. А. Макаров, Д. В. Тунцев, Р. Г. Хисматов; Патентообладатель ООО "ЭнергоЛесПром". Заявл. 03.10.2009; Опубл. 27.07.2010.
- Плеханова И. О. Степень самоочищения агродерново-подзолистых супесчаных почв, удобренных осадком сточных вод // Почвоведение. 2017. № 4. С. 506–512.
- Рижия Е. Я., Бучкина Н. П., Мухина И. М., Белинец А. С., Балашов Е. В. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. 2015. № 2. С. 211–220.
- Рэуце К., Кырстя С. Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 221 с.
- Рязанов С. С., Кулагина В. И., Грачев А. Н., Солодникова О. М., Сунгатуллина Л. М. Влияние температуры пиролиза осадков муниципальных сточных вод на формы тяжелых металлов (Cu, Ni, Pb) // Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности: Сб. ст. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / Сост. Л. С. Новополяцева; Под ред. И. С. Белюченко. Краснодар: КубГАУ, 2018. С. 31–33.
- Теппер Е. З., Шильникова В. К., Переверзева Г. И. Практикум по микробиологии. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1993. 175 с.
- Шляужене Д. Ю. Микромицеты в почвах, занятых бобовыми травами и кормовыми злаковыми культурами: Дис. ... канд. биол. наук. Вильнюс, 1983. 206 с.
- Ábrego J., Atienza-Martínez M., Gimeno J. R., Aibar J., Quílez D., Gea G. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition // 23rd European Biomass Conference and Exhibition. Vienna, Austria, 2015.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic Values of Greenwaste Biochar as a Soil Amendment // Soil Res. 2007. Vol. 45 (8). P. 629–634. DOI: 10.1071/SR07109.
- Gadd G. M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation // Mycological research. 2017. Vol. 111 (1). P. 3–49. DOI: 10.1016/j.mycres.2006.12.001.
- Krishnakumar S., Rajalakshmi A. G., Balaganesh B., Manikandan P., Vinoth C., Rajendran V. Impact of Biochar on Soil Health // International Journal of Advanced Research. 2014. Vol. 2 (4). P. 933–950.
- Lehman J., Da Silva J. P., Steiner C., Nehls T., Zech W., Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments // Plant and Soil. 2003. Vol. 249. P. 343–357.
- Liu T., Liu B., Zhang W. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment // Pol. J. Environ. Stud. 2014. Vol. 23(1). P. 271–275.
- Major J. Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems // International Biochar Initiative. 2010. URL: <https://biochar-international.org/> (дата обращения: 03.02.2011).
- 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. Vol. 39 (4). P. 1224–1235.
- Song D., Xue X. Y., Chen D. Z., He P. J., Dai X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation // Chemosphere. 2014. Vol. 109. P. 213–220. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.070.
- 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. Vol. 327. P. 235–246. DOI: 10.1007/s11104-009-0050-x.

Waqas M., Khan S., Qing H., Brian R., Cai C. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAH and potentially toxic element bioaccumulation in *Cucumis sativa* L. // Chemosphere. 2013. Vol. 105. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.064.

World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015. 192 p.

EFFECT OF BIOCHARS FROM SEWAGE SLUDGE ON PLANT GROWTH, SOIL MICROORGANISMS, AND NITROGEN CONTENT IN GREY FOREST SOILS

RYAZANOV
Stanislav Sergeevich

PhD, Research Institute of Ecology and Mineral Management Problems of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution Tatarstan Academy of Sciences), erydit@yandex.ru

KULAGINA
Valentina Ivanovna

PhD, Research Institute of Ecology and Mineral Management Problems of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution Tatarstan Academy of Sciences), viksoil@mail.ru

GRACHEV
Andrey Nikolaevich

D.Sc, Kazan National Research Technological University; Energolesprom, LLC, energolesprom@gmail.com

SUNGATULLINA
Lutsia Mansurovna

Research Institute of Ecology and Mineral Management Problems of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution Tatarstan Academy of Sciences), sunlyc@yandex.ru

ZABELKIN
Sergey Andreevich

Ph.D., Kazan National Research Technological University; Energolesprom, LLC, szabelkin@gmail.com

SHAGIDULLIN
Rifgat Roaldovich

Doctor of Chem. Sci., Institute of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (a separate subdivision of the State Scientific Institution of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan), shagidullin_@mail.ru

Keywords:

biochar
biomass and height of plants
groups of microorganisms
pyrolysis temperature
sewage sludge

Summary: The aim of this study was to assess the impact of biochar obtained from sewage sludge at different pyrolysis temperatures on the height and biomass of oat and mustard plants, as well as on the microbiological parameters of gray forest soil. The biochar was obtained at the fast pyrolysis unit FPP02 at a temperature of 300 + 20 °C and 500 + 20 °C. During the laboratory vegetation experiment, 2%, 5% and 10% of biochar from the soil weight were added to the soil. Oat and white mustard plants were grown in vegetational pots for 42 days. The height and biomass of white mustard plants increased compared to the control when adding 2 % and 5% of biochar obtained at 500 °C, and 2 % of biochar obtained at 300 °C. When 10% biochar obtained at 300° was added to the soil, the productivity of oat and mustard plants decreased compared to the control. The introduction of biochar from sewage sludge contributed to an increase in the total nitrogen content in the soil. At that the number of most trophic groups of microorganisms increased, and more significantly -- when biochar obtained at 300° was added. The highest correlation between the concentration of biochar obtained at 300° and the number of microorganisms was observed for microscopic fungi, the lowest -- for the group of pedotrophic microorganisms.

Reviewer: N. P. Buchkina
Reviewer: E. A. ZHarikova

Received on: 03 February 2020

Published on: 26 December 2020

References

- Ábrego J., Atienza-Martínez M., Gimeno J. R., Aibar J., Quílez D., Gea G. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition, 23rd European Biomass Conference and Exhibition. Vienna, Austria, 2015.
- Arinushkina E. V. Guidelines for chemical analysis of Soils. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1970. 487 p.
- Burenkov S. V. Grachev A. N. Zabelkin S. A. Thermal utilization of sewage sludge by rapid pyrolysis in a grid reactor, *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2016. T. 19. No. 22. P. 40–43.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic Values of Greenwaste Biochar as a Soil Amendment, *Soil Res*. 2007. Vol. 45 (8). P. 629–634. DOI: 10.1071/SR07109.
- Classification and diagnostics of the USSR soils. M.: Kolos, 1977. 225 p.
- Emcev V. T. Mishustin E. N. Microbiology. M.: Drofa, 2008. 444 p.
- Gadd G. M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation, *Mycological research*. 2017. Vol. 111 (1). P. 3–49. DOI: 10.1016/j.mycres.2006.12.001.
- Grachev A. N. Makarov A. A. Zabelkin S. A. Bashkirov V. N. Thermochemical processing of lignocellulosic raw material into biofuels and chemical products, *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013. T. 16. No. 21. P. 109–111.
- Grigor'yan B. R. Grachev A. N. Kulagina V. I. Sungatullina L. M. Kol'cova T. G. Ryazanov S. S. The effect of biochar on plant growth, microbiological and physico-chemical parameters of low humus soil in conditions of vegetational experiment, *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2016. T. 19. No. 11. P. 185–189.
- Krishnakumar S., Rajalakshmi A. G., Balaganesh B., Manikandan P., Vinoth C., Rajendran V. Impact of Biochar on Soil Health, *International Journal of Advanced Research*. 2014. Vol. 2 (4). P. 933–950.
- Kulagina V. I. Grachev A. N. Ryazanov S. S. Kol'cova T. G. Sungatullina L. M. Rupova E. H. Assessment of phytotoxicity as the first stage of environmental and biological assessment of the pyrolysis products of sewage sludge on soils, *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2018a. T. 21. No. 1. P. 164–168.
- Kulagina V. I. Sungatullina L. M. Grachev A. N. Shagidullin R. R. Ryazanov S. S. Zabelkin S. A. Kol'cova T. G. Assessment of the impact of biochar on microbiological and some physicochemical parameters of gray forest soil, *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2018b. No. 2 (14). P. 21–25.
- Lehman J., Da Silva J. P., Steiner C., Nehls T., Zech W., Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments, *Plant and Soil*. 2003. Vol. 249. P. 343–357.
- Liu T., Liu B., Zhang W. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment, *Pol. J. Environ. Stud*. 2014. Vol. 23(1). P. 271–275.
- Major J. Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems, *International Biochar Initiative*. 2010. URL: <https://biochar-international.org/> (data obrascheniya: 03.02.2011).
- Mescheryakov A. M. Soil decomposition with sulfuric and perchloric acids to determine nitrogen and phosphorus, *Pochvovedenie*. 1963. No. 5. P. 21–30.
- Mishustin E. N. Microorganisms and soil fertility. M.: Izd-vo AN SSSR, 1956. 342 p.
- Plehanova I. O. Self-remediation rate of agro-soddy-podzolic sandy loam soils fertilized by sewage sludge, *Pochvovedenie*. 2017. No. 4. P. 506–512.
- Reuce K. Kyrstya S. Fight against soil pollution. M.: Agropromizdat, 1986. 221 p.
- Rizhiya E. Ya. Buchkina N. P. Muhina I. M. Belinec A. S. Balashov E. V. The influence of biochar on the properties of samples of sod-podzolic sandy loam soil with varying degrees of cultivation (laboratory experiment), *Pochvovedenie*. 2015. No. 2. P. 211–220.
- Ryazanov S. S. Kulagina V. I. Grachev A. N. Solodnikova O. M. Sungatullina L. M. Influence of pyrolysis temperature of municipal wastewater sludge on forms of heavy metals (Cu, Ni, Pb), *Ekologicheskie problemy razvitiya agrolandshaftov i sposoby povysheniya ih produktivnosti: Sb. st. po materialam Mezhdunar. nauch. ekol. konf., Sost. L. P. Novopol'ceva; Pod red. I. P. Belyuchenko*. Krasnodar: KubGAU, 2018. P. 31–33.
- Shlyauzhene D. Yu. Micromycetes in soils occupied by legumes and forage cereals: Dip. ... kand. biol. nauk. Vil'nyus, 1983. 206 p.
- 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. Vol. 39 (4). P. 1224–1235.
- Solid mineral fuel. Technical analysis. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55375/> (data obrascheniya: 12.05.2020).
- Song D., Xue X. Y., Chen D. Z., He P. J., Dai X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and **heavy metal accumulation**,

- Chemosphere. 2014. Vol. 109. P. 213–220. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.070.
- Tepper E. Z. Shil'nikova V. K. Pereverzeva G. I. Microbiology workshop. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Kolos, 1993. 175 p.
- The method of thermal processing of organic containing raw materials. 2009, A. N. Grachev, V. N. Bashkirov, P. A. Zabelkin, A. A. Makarov, D. V. Tuncev, R. G. Hismatov; Patentobladatel' OOO «EnergoLesProm». Zayavl. 03.10.2009; Opubl. 27.07.2010.
- 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. Vol. 327. P. 235–246. DOI: 10.1007/s11104-009-0050-x.
- Waqas M., Khan S., Qing H., Brian R., Cai C. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAH and potentially toxic element bioaccumulation in Cucumis sativa L., Chemosphere. 2013. Vol. 105. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.064.
- World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015. 192 p.