



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной и системной экологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТРА**

На тему Влияние различных биоуглей на агроэкологические показатели
дерново-подзолистой почвы

Исполнитель Костецкий Даниил Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат биологических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Рижия Елена Яновна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой _____

(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Алексеев Денис Константинович
(фамилия, имя, отчество)

09 06 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Литературный обзор.....	6
1.1 Биоуголь основные свойства	6
1.2 Технологии и эксплуатация	7
1.2.1 Источники и основное сырье	7
1.2.2 Производство биоугля	9
1.2.3 Общие соображения по внесению биоугля	11
1.3 Влияние биоугля на агроэкологические характеристики почвы	13
1.3.1 Влияние биоугля на физические свойства почвы.....	14
1.3.2 Влияние биоугля на физико-химические и химические свойства	14
1.3.3 Влияние биоугля на доступность питательных веществ растениям	16
1.3.4 Влияние биоугля на почвенную биоту	17
1.4 Влияние биоугля на урожайность	18
1.5 Экологические преимущества биоугля.....	19
1.5.1 Воздействие биоугля на экосистему	20
1.5.2 Снижение эмиссии парниковых газов	21
1.5.3 Сорбция токсикантов и тяжелых металлов	22
1.6 Потенциальные риски от внесения биоугля.....	24
Глава 2. Объекты и методы.	26
2.1 Объекты.....	26
2.2 Закладка и схема эксперимента	30
2.3 Методы	33
Глава 3. Результаты и обсуждение.	34
3.1 Изменение основных биогенных элементов и значений рН в почвах под воздействием различных биоуглей	34
3.1.1 Содержание минерального азота в почве	34
3.1.2 Содержание подвижного фосфора в почве	37
3.1.3 Содержание подвижного калия в почве	41

3.1.4 Изменение значений рН	45
3.2Изменение концентрации тяжелых металлов в почвах при внесении различных биоуглей.....	47
3.2.1 Содержание меди в почве	48
3.2.2 Содержание цинка в почве.....	51
3.2.3 Содержание свинца в почве	55
3.2.4 Содержание кадмия в почве.....	58
3.3Влияние биоуглей на содержание NPK в вико-овсяной смеси.....	61
3.3.1Содержание азота в вико-овсяной смеси.....	61
3.3.2Содержание фосфора в вико-овсяной смеси.....	63
3.3.3Содержание калия в вико-овсяной смеси.....	64
3.4Влияние биоуглей на биомассу вико-овсяной смеси	66
Заключение	68
Списокиспользованнойлитературы.....	73

Введение

С начала XXI века исследователи всего мира стали уделять пристальное внимание высокоуглеродистому твердому веществу, получаемому путем пиролиза биомассы, которому присвоили название биоуголь (с англ. biochar).

Немалый интерес к данному продукту заключается в его уникальных свойствах: высокая пористость, большая удельная площадь поверхности и емкость катионного обмена, которые характеризуют биоуголь как широкопрофильный сорбент, позволяющий удерживать в почве влагу, питательные вещества и переводить загрязнители в труднодоступную для растений форму [3, 21, 39].

Биоугли возможно производить из широкого спектра отходов органического происхождения, что является одним из перспективнейших способов их утилизации. Конечные свойства биоугля главным образом зависят как от исходного сырья, определяющего его химический состав, количество макропор и содержание зольных веществ, так и от технологического процесса пиролиза (скорости процесса и температуры), от которого зависят изменения в морфологии и структуре поверхности с различным соотношением C:H [21, 35, 63].

К настоящему времени уже имеется многочисленный опыт лабораторных и полевых исследований, показывающих, что добавление биоугля из различного сырья и в различных дозах достаточно эффективно для улучшения почвенных характеристик [35, 37, 54].

Биоуголь вещество с комплексным воздействием на почвенные экосистемы, охватывая физические, химические и биологические компоненты почвы [37, 54]. Отмечается его способность иммобилизовать токсиканты и загрязняющие вещества [41,63]. Смягчать последствия изменения климата, главным образом за счет снижения эмиссии парниковых газов[52].

В связи со своей универсальностью и комплексностью воздействия, биоуголь имеет весьма широкие перспективы в управлении почвенными экосистемами, и является многообещающим мелиорантом.

Однако, несмотря на то, что исследования по внесению биоугля в почву ведутся во многих странах, всё жесобрано недостаточно информации, чтобы дать однозначно положительный ответ о влиянии биоуглей на конкретные типы почв. Важным моментом является разработка предварительных методик по внесению биоуглей с гарантией отсутствия их негативного воздействия на каждую конкретную почву и на каждую конкретную культуру.

Объект исследования – агроэкологические характеристики дерново-подзолистой супесчаной почвы со средней и высокой степенью окультуренности.

Предмет исследования – влияние различных биоуглей на основные агроэкологические характеристики дерново-подзолистой почвы разной степени окультуренности.

Новизна: следует отметить, что сравнительный анализ влияния биоуглей из отходов растительного и животного происхождения на дерново-подзолистые почвы разной степени окультуренности не проводился на территории Российской Федерации (до данного времени исследовался только древесный биоуголь). Результаты проведенного исследования указывают на неоднородный характер влияния различных биоуглей на основные свойства, характеризующие плодородие почв. Это дополняет сведения о неоднородном влиянии различных типов биоуглей при внесении их в одну почву, подкрепляя представление о том, что для наиболее рационального природопользования для каждой конкретной почвы, целесообразен подбор определенных типов биоуглей.

Полученные данные расширяют знания мирового сообщества, изучающего биоуголь с целью внедрения практики по его применению в сельском и лесном хозяйстве, и на селитебных территориях.

Цель магистерской диссертации - изучить влияние различных биоуглей на агроэкологические показатели дерново-подзолистой почвы с разной степенью окультуренности.

Задачи:

- 1) Провести анализ изменения основных биогенных макроэлементов и значений pH в почвах под воздействием различных биоуглей;
- 2) Изучить изменение концентрации тяжелых металлов в почвах при внесении различных биоуглей;
- 3) Исследовать влияние различных биоуглей на содержание NPK в вико-овсяной смеси;
- 4) Оценить влияние различных биоуглей на биомассу вико-овсяной смеси;
- 5) На основе полученных данных дать сравнительную характеристику и ранжировать различные биоугли по степени их влияния на исследуемые почвы и культуру.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Биоуголь основные свойства и применение

Внедрение новых инновационных методов управления агроэкосистемами актуально для сохранения, поддержания и укрепления почвенного плодородия в условиях все возрастающей антропогенной нагрузки и следующей за ней деградации земель.

Сравнительно недавно внимание ученых привлекло высокоуглеродистое твердое вещество – биоуголь.

Сначала двадцать первого века биоуголь активно исследуется, как почвенный мелиорант, главным образом ценный возможностью его внесения в почвы с целью повышения их плодородия и секвестрации парниковых газов. Международный интерес в исследовании его свойств, а так же возможностей потенциального применения, начался после первых материалов о химическом мониторинге сельскохозяйственных почв Латинской Америки, которые в своем генетическом профиле содержали большое количество древесного угля. Почвам было присвоено название Терра Прета (черная земля индейцев), как особенно отличающихся от окружающих естественных лесных почв высоким плодородием [38].

Ученых всего мира заинтересовала потенциально высокая ценность применения биоугля для управления почвенными экосистемами, в дальнейшем многими исследованиями, экспериментально было подтверждено, что внесения биоугля в почвы достаточно эффективно, как с экономической, так и с экологической точки зрения [23, 52,63].

Согласно мандату качества биоугля, под биоуглем подразумевается - твердый материал, полученный в результате термохимической конверсии биомассы из устойчивых источников в среде с ограниченным содержанием кислорода с использованием чистых процессов и который используется для любых целей, не связанных с его быстрой минерализацией до CO₂ [64].

Данный продукт имеет весьма широкий спектр потенциального применения, его используют в качестве почвенного мелиоранта в чистом виде или совместно с другими удобрениями [7, 66], так же он может использоваться в качестве источника энергии, фильтров для воды, подстилки, силоса или кормовых добавок для животных [64, 66].

1.2 Технологии и эксплуатация

В основе своей биоуголь это твердоевысокоуглеродное вещество, содержащее стабильный углерод в ароматической форме, но также биоуголь содержит в себе другие примеси, такие как зольные компоненты и летучие органические соединения [35, 41, 63].

Конечный состав биоугля, и как следствие его положительные и отрицательные свойства, тесно связаны, как с исходным сырьем, так и спецификой технического процесса, что напрямую влияет на такие характеристики биоугля, как гранулометрический состав, значения рН, общую площадь поверхности, пористость, плотность, влагоудерживающую способность, содержание зольных элементов и иных примесей [35, 49, 54, 63].

1.2.1 Источники и основное сырье для производства

Для производства биоугля рассматривается только сырье из биомассы [64]. При этом биоуголь может производиться из биомассы различного происхождения [4, 29, 35, 54, 63, 66], в его производстве можно применять, как непосредственнопервичную биомассу, так и отходы органического происхождения.

Согласно мандату качества биоугля, все иные примеси не органического происхождения (пластик, камень, стекло, металлы и т.д.) не должны превышать 0.25% от сухого веса биоугля [64]. Также производителям рекомендуется указывать сырье, используемое в

производстве биоугля, его компонентный состав, в том числе примеси, которые потенциально могут содержаться в конечном продукте.

Возможность производства биоугля из отходов органического происхождения делает его процесс производства и применения весьма многообещающим направлением в решении ряда проблем, связанных с утилизацией органических отходов [4, 2035,54]. Следует отметить, что биоуголь может бороться с патогенными микроорганизмами, выводить в малодоступную форму тяжелые металлы и иные загрязняющие вещества содержащихся в органических отходах. Это особенно актуально для утилизации отходов животноводства имеющих высокий класс опасности.

Получаемые биоугли весьма разнятся по своим свойствам. Этому способствует разнообразие потенциального сырья, из которого делают биоуголь, и технические условия его производства (температура, продолжительность пиролиза)[35, 48, 54]. Поэтому, при внесении в почву биоугли с разным исходным составом, будут по-разному влиять на плодородие почв и урожайность разнообразных сельскохозяйственных культур[35, 41, 49].

В таблице 1.1 представлены свойства биоугля произведенного из отходов различного происхождения, по мета-анализу [23].

Таблица 1.1. Свойства биоугля, приготовленного из различного сырья, выход биоугля в, % относительно исходной биомассы

Исходное сырье	T, °C	Скорость, с	Выход биоугля, %	pH	Площадь поверхности мм ² /г	Объем пор см ³ /г	Зольность, %
Рисовая шелуха	400	300	33.5	10.1	55.9	0.014	23
Древесная кора	500	240	27.8	11.9	67.5	0.054	27.6
Хвосты сахарной свеклы	400	240	26.2	10.7	40.1	0.021	11.1
Растительные остатки	400	300	31.8	10.5	84	0.016	15.5

Продолжение таблицы 1.1

Исходное сырье	T, °C	Скорость, с	Выход биоугля, %	pH	Площадь поверхности мм ² /г	Объем пор см ³ /г	Зольность, %
Органические отходы	500	300	22.1	9.4	55.4	0.026	13.4
Коровий навоз	500	240	33.5	8.8	44.4	0.022	33.5
Птичий помет	500	240	23.7	9.6	51	0.029	22.7
Человеческие фекалии	500	240	36.1	8.1	42.1	0.057	26.1

1.2.2 Производство биоугля

Биоуголь может быть получен как продукт нескольких процессов, а именно: медленного и быстрого пиролиза и газификации биомассы.

При быстром пиролизе биомасса исходного сырья сжигается в отсутствие кислорода при температуре в 500–1000 °C, а время пребывания составляет <1 с. В случае же медленного пиролиза биомасса сжигается в отсутствие кислорода при температуре 300–700 °C, а время пребывания варьируется от минут до часов. А во время газификации биомасса сжигается в ограниченном присутствии кислорода при температуре в 750-1000 °C, а время пребывания варьируется от секунд до часов. [23, 41, 46].

В таблице 1.2 представлено краткое изложение технического процесса и усредненного процента получаемого биоугля [23].

Таблица 1.2. разновидности производства биоугля

Процесс	Температура, °C	Скорость, с	Средний выход биоугля, % относительно биомассы
Медленный пиролиз	300-700	От нескольких минут до нескольких часов	40
Быстрый пиролиз	500-1000	Несколько секунд	20
Газификация	700-1000	От нескольких секунд до нескольких часов	7-10

Для максимального выхода биоугля метод, выбранный для производства, должен соответствовать типу биомассы, а также должны учитываться условия производства, такие как скорость нагрева, температура, время пребывания и т. д., и должны быть оптимальными. Эти условия имеют решающее значение, поскольку они могут повлиять на физическое и химическое состояние биоугля в процессе производства.

Морфология биоугля, полученного из биомассы растений, варьируется в зависимости от условий процесса, поскольку она связана с потерей веса биомассы. Первоначально наблюдается потеря веса из-за потери воды из биомассы, которая начинается при температуре около 100 °С и продолжается за счет разложения целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, происходящего выше 220 °С [23; 63].

Температура пиролиза является ключевым фактором, влияющим на морфологию собранного биоугля, где при температуре ниже 300 °С происходит частичная карбонизация биомассы. С другой стороны, при пиролизе с более высокой температурой степень карбонизации увеличивается, достигается пористая структура и большая площадь поверхности. Кроме того, тип газоносителя считается критическим вопросом, поскольку использование диоксида углерода приводит к увеличению площади поверхности и кислородных функциональных групп на поверхности по сравнению с азотом. При этом идеальная температура пиролиза не является фиксированной величиной и зависит в основном от состава утилизируемой биомассы. [41; 45].

Как итог, биоугли из разных источников сырья и при различных методах пиролиза различаются по размеру пор, рН, емкости, площади поверхности и заряду, и как следствие, ведут себя по-разному в различных почвах [36, 41, 61].

Следует заметить, что независимо от исходного сырья и метода пиролиза, биоугли практически всегда благоприятно влияют на увеличение значения рН, влагоудерживающей способности почвы, емкости катионного

обмена, а также на общее количество стабильного ароматического почвенного углерода в почве. [41].

Согласно мандату качества биоугля, побочные фракции, полученные в результате производства биоугля, должны использоваться или утилизированы в соответствии с законодательством. Выбросы твердых частиц должны соответствовать нормативным требованиям, равно как и выбросы окиси углерода, летучих органических соединений и твердых частиц [64].

1.2.3 Общие соображения по внесению биоугля в почвы

Перед предварительным внесением биоугля, необходимо знание характеристик непосредственно самого биоугля.

В основе своей внесение биоугля должно удовлетворять непосредственно потребности, для которых его вносят. Опыт ранее проведенных исследований подводит к тому, что для наиболее рационального природопользования для каждой конкретной почвы, целесообразен подбор определенных типов биоуглей и вносимых доз биоугля.

Как уже утверждалось ранее, свойства биоугля напрямую зависят от того из чего и как производится биоуголь, в том числе важен подбор доз внесения биоугля. Рекомендаций по дозировкам практически не существует, для использования биоугля в хозяйстве необходимо ориентироваться либо на предварительные исследования перед его внесением в почвы или на опыт ранее проведенных экспериментов, где биоугля применялся в схожих условиях и для схожих культур, что ограничивает его хозяйственное применение.

Для непосредственного использования биоуголь должен обладать рядом качеств [64]:

1. Он должен быть безопасным для нанесения в почву. Под безопасностью подразумевается, что биоуголь не превышает предельно допустимую концентрацию загрязняющих веществ;

2. Биоуголь должен содержать не менее 10 % стабильного органического углерода по массе в пересчете на органическое вещество, под стабильной подразумевается та часть углерода, которая при внесении остается стабильной не менее 100 лет;

3. После пиролиза, биоуголь должен сохранять не менее 30% органического углерода, присутствующего в сырье, в стабильной форме;

4. Полный жизненный цикл биоугля должен стремиться к углеродной нейтральности.

Любой материал не соответствующий критериям качества, предложенным мандатом качества, не может определяться, как биоуголь. Такой материал не подходит для внесения в почвы, но может быть пригоден для использования в других целях, например в качестве топлива.

Помимо учета и требований к непосредственно самому сырью и технологическому процессу, согласно мандату качества биоугля, рекомендуется, чтобы жизненный цикл производства и использования биоугля должен быть построен на принципах устойчивого развития. Мандатом предложены следующие рекомендации:

1. Используемое сырье должно быть легальным и регулироваться законодательно;

2. Экологический мониторинг используемого сырья, включая цепочку его поставок;

3. На всем этапах производства и эксплуатации, должен проводиться мониторинг жизненного цикла парниковых газов;

Производителя биоугля должны предоставлять доказательства того, что данные условия соблюдены [64].

Создание отечественных стандартов качества является одной из самых актуальных задач, что в значительной степени затруднено в связи с очень

маленьким масштабом хозяйственного применения биоугля в России, где биоуголь используется только в рамках лабораторных или полевых экспериментов.

1.3 Влияние биоугля на агроэкологические характеристики почвы

Биоуголь оценивается как вещество, имеющее большую площадь поверхности, хорошо развитую пористую структуру, большое количество обменных катионов и питательных элементов, обладает эффект известкования. Свойства почвы могут быть улучшены после внесения биоугля [33, 41, 54,63,66].

В исследовании, проведенном Яном с соавторами [35], выделяются три основных аспекта воздействия биоугля на почвенные характеристики.

Во-первых, важны непосредственно свойства биоугля, как уже было показано ранее, зависящие от исходного сырья и технологического процесса пиролиза.

Во-вторых, важным аспектом является условия и нормы внесения биоугля, а именно дозировка и периодичность внесения мелиоранта, следует заметить, что на данный момент большая часть исследований является краткосрочными и лабораторными, многолетние наблюдения единичны.

В-третьих, необходим учет непосредственно свойств почвы, зависящих от ее таксономической разновидности, степени окультуренности и иных форм антропогенного воздействия.

Также подчеркивается важность предварительной оценки влияющих факторов и реакции почв на внесение биоугля, так как это напрямую влияет как на эффективность применения биоугля для улучшения агроэкологических характеристик, так и для минимизации возможного ущерба.

1.3.1 Влияние биоугля на физические свойства почвы

Биоуголь напрямую влияет на физические свойства почвы, улучшая ее выдерживающую способность, пористость и почвенную аэрацию, способность образовывать структуры и агрегаты, а также повышает устойчивость почв к эрозии [51, 63].

Улучшение физических характеристик почвы во многом тесно связано друг с другом, так биоуголь за счет своей высокопористой структуры способен увеличивать пористость почвы, что ведет за собой увеличение площади поверхности, и как следствие растет водоудерживающая способность почвы [35, 66].

Внесение биоугля также улучшает почвенную структуру за счет значительного увеличения пористости и аэрации почвы [41]. Хорошо развитая структура пор может не только повысить способность удерживать воду, но и обеспечить убежище для почвенных микроорганизмов, таким образом, можно улучшить удержание элементов питания [35].

Внесение биоугля также изменяет цвет почвы, делая его более темным, что напрямую влияет на альбедо поверхности. Так в мета-анализе проведенном Шриваставой [66] отмечается, что при внесении биоугля альбедо снижается в среднем на 37 %, а температура поверхности почвы повысилась в среднем до 4 °C за счет темного цвета биоугля.

1.3.2 Влияние биоугля на физическо-химические и химические свойства

Биоуголь весьма перспективен в улучшении химических свойств почв. Результаты ранее проведенных исследований отмечают значительные изменения в содержании подвижных форм фосфора и калия, минерального и органического азота и углерода, а так же увеличение значений pH [41, 54, 66].

Главным образом это связано с тем, что биоуголь это высокоуглеродный сорбент, с огромной площадью поверхности и весьма развитой емкостью катионного обмена [63].

Продукты карбонизации, такие как биоуголь содержат многочисленные щелочные вещества, например карбонат кальция, который влияет на реакцию почвы, как следствие биоуголь обладает известковательным эффектом, способен увеличивать значения рН почвы [63, 69], что улучшает доступность растениям основных макро и микроэлементов, особенно если почвы, в которые мы вносим биоуголь изначально кислые.

Следует отметить, что значение рН может менять при повышении температуры пиролиза, так же это зависит от содержащихся в биоугле зольных элементов [35]. Увеличение рН является общей чертой практически для всех биоуглей [41,62].

Следует отметить, что значение рН может менять при повышении температуры пиролиза, так же это зависит от содержащихся в биоугле зольных элементов [35]. Увеличение рН является общей чертой практически для всех биоуглей [41,62].

В таблице 1.3 представлено воздействие различных биоуглей на физические, химические и физико-химические свойства почвы, основанного на данных мета-анализа проведенного Шриваставой[65].

Таблица 1.3.Обобщенная реакция применения биоугля на физические,физико-химические и химические свойства почвы

Вид биоугля	Почва	Влияние на свойства почвы/изменения качества почвы
Различные типы сырья	Различные почвы	Повышение рН почвы, ЕКО, доступных К, Са, Mg, общего N и доступного P; снижение насыщения Al кислых почв.
Древесный биоуголь	Антросол и Ферралсол	Возрастает содержаниеС в почве, значений рН и доступного P; снижение вымывания N, P и R из вносимых удобрений и снижение содержания Al.
эвкалипт, кукурузная солома	Окисоль	Увеличение общего N, поступающего из атмосферы, до 78%; более высокое общее восстановление азота в почве с добавлением биоугля.

Продолжение таблицы 1.3

Вид биоугля	Почва	Влияние на свойства почвы/изменения качества почвы
Древесина и навоз	Различные почвы	Увеличить насыщенную гидравлическую проводимость почвы и доступность воды для растений, а также увеличите общую концентрацию азота в почве и ЕКО, улучшив емкость почвы и уменьшив выщелачивание $\text{NH}_4\text{-N}$.
Навоз, кукурузная солома, пищевые отходы	Альфизол	Концентрация азота уменьшалась с повышением температуры и скорости пиролиза, но увеличивалось содержание калия и натрия.
Корпус арахиса	Ультисоли	В поверхностном слое почвы (0–15 см) повышены К, Са и Mg. Повышение К отражалось в анализе тканей растений.
Пшеничная солома	Антросоли	Повышение рН почвы, органического углерода, общего азота и сокращение выбросов N_2O в зависимости от урожайности

1.3.3 Влияние биоугля на доступность питательных веществ растениям

Увеличение накопления углерода, повышение плодородия почвы и уменьшение выщелачивания питательных веществ являются одними из наиболее выраженных эффектов внесения биоугля в почву [41, 54, 63].

Биоуголь может увеличить доступность растениям почвенных питательных веществ за счет высвобождения, удержания или уменьшения выщелачивания элементов питания, в том числе за счет уменьшения потерь газообразных форм азота. Таким образом, биоуголь имеет большой потенциал в улучшении плодородия почвы [35; 41].

Увеличение доступности питательных веществ, особенно подвижных форм фосфора и калия, связано не только с сорбционными свойствами биоугля, но и зависит от повышения рН почвы [22].

Однако общее содержание азота, фосфора и калия в биоуглях не обязательно будет отражать фактическую доступность этих питательных веществ для растений [65].

Многие исследования показали, что биоуголь может улучшать способность почвы удерживать питательные вещества уже после внесения, тем самым становясь мелиорантом с медленным высвобождением питательных веществ [33, 35, 63, 66].

Таким образом, улучшение физических, химических и физико-химических свойств почвы способствует повышению продуктивности растений за счет увеличения количества и доступности питательных элементов, уменьшения их выщелачивания.

1.3.4 Влияние биоугля на почвенную биоту.

Биоуголь влияет на состав и численность почвенной биоты, главным образом за счет своей высокопористой структуры, за счет которой биоугли могут создавать благоприятные условия для микроорганизмов, как следствие, улучшая плодородие и продуктивность почв, а также за счет прямого влияния на рост и развитие растений, насыщения их питательными элементами [63].

Отрицательное, нулевое или положительное воздействие биоугля на почвенную биоту может зависеть от биоугля и типа почвы [35]. Однако, как правило, внесение биоугля благоприятно сказывается на почвенной биоте.

Следует отметить, что биоуголь сильно влияет на состав и численность почвенной биоты в зависимости от источника сырья и технологии производства конкретного биоугля. [41]. Биоугли весьма благоприятно сказываются на биоразнообразии почвенных грибов [23].

Следует отметить, что углерод в биоугле находится в стабильной ароматической форме, что препятствует его быстрой минерализации почвенными микроорганизмами [54].

Биоуголь способствует развития в почве азотных бактерий, благодаря которым в почве накапливается азот, увеличивая удерживание NH_3 и NH_4^+ , уменьшаются выбросы N_2O [63].

Внесение биоугля в почву с высоким содержанием нефтепродуктов приводит к усилению микробной стимуляции и, как следствие, более высокой минерализации азота,[28].

В своем мета-анализе Салетник с соавторами[63] приводит примеры воздействия биоугля на почвенную микрофлору таблица 1.4.

Таблица 1.4.Влияние применения биоугля напочвенную биоту

Тип биоугля (сырье)	Воздействие на почвенную биоту
Древесина ивы и свиной навоз: медленный пиролиз при 350 °С медленный пиролиз при 700 °С	Увеличение микробной биомассы в обоих случаях: повышенная активность дегидрогеназы. снижение активности дегидрогеназы.
Птичий помет и сосновая щепа (пиролиз при 400 и 500 °С)	Увеличение микробной биомассы.
Листья и обломанные ветки	Увеличение скорости роста грибков и бактерий.
Древесина (быстрый пиролиз)	Увеличение микробной биомассы.

1.4 Влияние биоугля на урожайность

В исследовании, проведенном Яном с соавторами [35], выделяются следующие механизмы воздействия биоугля на улучшение урожайности почвы:

Во-первых, биоуголь являются источником питательных веществ.

Во-вторых, биоуголь может улучшить физические и химические свойства почв.

В-третьих, биоуголь может хранить питательные вещества и использоваться в качестве удобрения с медленным высвобождением.

В-четвертых, биоуголь может улучшить биологические свойства почвы, в том числе микробную численность, структуру и активность.

В таблице 1.5 представлено влияния биоуглей на урожайность различных культур, данные обобщены рядом мета-анализов [35, 41].

Таблица 1.5. Влияние добавления биоугля на урожайность

Тип биоугля	Доза, т/га	Культура	Тип почвы	Увеличение урожайности, % относительно контроля
Зеленые отходы	10	Редька посевная	Альфизолы	-30
Зеленые отходы	50	Редька посевная	Альфизолы	91
Зеленые отходы	100	Редька посевная	Альфизолы	130
Лиственные породы	19	Кукуруза	Моллисоли	10
Лиственные породы	38	Кукуруза	Моллисоли	17
Лиственные породы	58	Кукуруза	Моллисоли	48
Пшеничная солома	40	Рис	Рисовая почва	14
Арахисовая шелуха	0.45	Рис	Антрозоль	10
Вторичная лесная древесина	68	Вигна	Ферасол	20
Птичий помет	10	Редька посевная	Альфизолы	42
Птичий помет	50	Редька посевная	Альфизолы	96
Свиной навоз	0.45	Рис	Антрозоль	13
Коровий навоз	15	Кукуруза	Моллисоли	150

1.5 Экологические преимущества биоугля

В течение последних десятилетий многие исследователи отмечают целый ряд агроэкологических преимуществ от внесения биоугля [41, 52,63].

По характеру воздействия и цели применения можно выделить следующие основные экологические преимущества при внесении биоугля:

Во-первых, мелиорирующий эффект биоугля, повышение почвенного плодородия и увеличение урожайности, за счет комплексного изменения почвенных характеристик.

Во-вторых, применения биоугля для снижения эмиссии парниковых газов, главным образом за счет перевода углерода в стабильную форму и общее повышение сорбции парниковых газов таких как N₂O и NH₄.

В-третьих, применения биоугля для увеличения сорбции токсикантов и иммобилизации тяжелых металлов.

1.5.1 Воздействия биоугля на экосистему

Биоуголь имеет потенциально широкие перспективы, как мелиорант для повышения почвенного плодородия [7; 16;35; 63]. Не менее перспективно применения биоугля для рекультивации нарушенных земель [32,52, 66].

Биоуголь так же является решением проблемы истощения почв, потери питательных веществ, связанной как с естественным выщелачиванием и эрозией, так и потерей питательных веществ, связанной с эксплуатацией сельскохозяйственных земель [35, 52].

Биоуголь является весьма универсальным мелиорантом, благоприятен для внесения, как в кислые бедные питательными веществами почвы северного полушария, так и в почвы засушливых районов (особенно песчаных), где помимо увеличения удержания в почве питательных веществ, отмечалось улучшение водоудерживающей способности почвы [7, 40,48, 54]. Особенно хорошие результаты он показывает на почвах с легким гранулометрическим составом.

Земли становятся более продуктивными, снижается общая потребность в количестве задействованных земель, что будет иметь за собой, прямое и косвенное воздействие на экосистемы [52, 60].

В целом механизмы воздействия биоугля на почвенные экосистемы на данный момент изучены мало. Все исследования, как в России, так и зарубежом, охватывают ограниченный аспект воздействия биоугля, например, на увеличение доступности элементов питания или секвестрации

углерода. Существует острая необходимость в комплексных исследованиях воздействия биоугля с применением экосистемного подхода.

1.5.2 Снижение эмиссии парниковых газов

Внесение биоугля в почву имеет широкий потенциал в смягчении последствий изменения климата, главным образом за счет снижения эмиссии парниковых газов с сельскохозяйственных земель.

Половина сокращения выбросов парниковых газов и большая часть секвестрации CO₂ являются результатом того, что биоуголь сохраняется в стабильном состоянии на один-два порядка дольше, чем биомасса, из которой он сделан, среднее время пребывания биоугля в почвенной среде оценивается в 100–1500 лет [54].

Внесение биоугля в почву могут влиять, как на выбросы парниковых газов главным образом за счет:

1. Более высокой стойкости биоугля по сравнению с остатками непиролизированной биомассы (до 50 % чистого сокращения выбросов парниковых газов);

2. Общего увеличения урожайности, увеличения доступности растениям углерода, и иных питательных веществ (NPK);

3. Снижения минерализации существующего почвенного органического углерода вместе с общим повышением удержания новых поступающих растительных остатков.

4. Снижения утилизации жидких и газообразных фракций в биоугле, возможность их использования, например, как в качестве топлива, широкий потенциал для замкнутых циклов производства.

Подводя итог - когда специально выращенную биомассу собирают для производства биоугля, а затем повторно выращивают, последующие циклы повторного роста, производства и применения биоугля могут со временем увеличивать запасы углерода и снижать выбросы парниковых газов [52].

Мета-анализ обещающий опыт 20-летних исследований биоугля [54] установил, что внесение биоугля благоприятно сказывается на снижении эмиссии парниковых газов отличимых от CO₂, отмечается снижении на 10-42 %, зависящая, как от источника биоугля, так и технологии производства.

Выбросы CH₄ и N₂O из почвы, которые не связаны с углеродом или азотом в биоугле, также могут снижаться после добавления биоугля [52]. В своем исследовании Борхард с соавторами [25] отмечает, что выбросы N₂O сокращаются в среднем на 38% в первый год применения, при этом чистое сокращение выбросов составляет >10%, зарегистрированное в течение нескольких лет. Снижение выбросов парниковых газов, таких как N₂O и CH₄ отмечается и у отечественных исследователей, например [7; 12]. Так в эксперименте, проведенном Рижия с соавторами [18], установлено снижении эмиссии N₂O на 20-36 %.

При этом самые большие различия между системами биоугля в их потенциале смягчения последствий изменения климата, на единицу произведенного биоугля связаны с выбором источника биомассы.

Использование отходов органического происхождения в производстве представляет собой весьма перспективное направление не только в том плане, что для производства биоуглей не задействуются древесное сырье, которое распространено в традиционных методах производства биоугля, а дополняется тем, что происходит утилизация накопившихся отходов, в процессе пиролиза устраняются патогены, органические загрязнители. Особенно перспективен пиролиз биоуглей из отходов животноводства, навоза крупного рогатого скота и птичьего помета [74].

1.5.3 Сорбция токсикантов и тяжелых металлов

Биоуголь благодаря своей высокой сорбционной способности, может улавливать некоторые токсичные соединения, такие как пестициды и гербициды, тяжелые металлы [41, 57, 63], тем самым ограничивая их

попадание в пищевую цепь. Сорбционная способность биоугля может превышать естественное органическое вещество почвы в десятки раз [66].

Примеры использования биоугля для иммобилизации загрязнителей с водной и почвенной среды представлены в таблице 1.6, составленной на основе мета-анализа проведенного Салетником с соавторами [63].

Таблица 1.6.Использование биоугля для выноса загрязнителей из почвы и воды

Загрязнитель	Тип биоугля (сырье /температура пиролиза)	Тип среды
Сельскохозяйственные химикаты	Навоз крупного рогатого скота (450 C)	Почва
Атразин	Навоз крупного рогатого скота (200 C)	Вода
Атразин и симазин	Зеленые отходы (450 C)	Вода
Пентахлорфенол	Бамбук (600 C)	Почва
Сульфаметазин	Твердая древесина (600 C)	Вода
Сульфамероксазол	Бамбук (450-600 C)	Вода
Тилозин	Твердая древесина (850-900 C)	Вода
Тетрациклин	Рисовая шелуха (450-500 C)	Вода
Перене	Кукурузный початок (600 C)	Вода
Трихлорэтилен	Опилки (400-1700 C)	Вода
Нафталин	Скорлупа арахиса (300-700 C)	Вода
Тяжелые металлы	Хвоя сосновая (100-700 C)	Вода

В исследовании, проведенном Ву с соавторами [70], отмечается, что применение биоугля ускоряет биоремедиацию органических соединений, в том числе за счет возрастающей микробной активности,но при этом внесение биоугля не способствует удалению тяжелых металлов из почвы, но трансформирует их в малодоступную для растений форму.

Положительные изменения в концентрации тяжелых в почвах с биоуглем исследователи связывают, прежде всего с эффектом снижения кислотности и его высокими адсорбционными свойствами. Сорбирующая способность биоугля увеличивается за счет окисления ароматических колец и внедрения кислородсодержащих функциональных групп на поверхности

карбонизированного продукта [53], изменения заряда поверхности с увеличением емкости катионного обмена [44].

Как итог, основной вклад в сорбцию загрязняющих веществ вносит общая площадь поверхности биоугля, что важно учитывать если перед нами стоит цель борьбы с почвенными загрязнением.

1.6 Потенциальные риски от внесения биоугля

Опубликованы сотни обзоров, посвященные конкретным аспектам биоугля и его влиянию на свойства почвы и продуктивность растений. Исходя из этих обзоров, становится понятно, что внесение биоугля представляет некий риск как положительного, так и отрицательного (неоднозначного) воздействия биоугля на агроэкологическое состояние почв и рост растений [7, 4,35,41]. И чтобы избежать отрицательное воздействие карбонизированного мелиоранта, требуются предварительные лабораторные испытания для конкретных почв, характерных для местности, в которую они будут вноситься.

Основные риски внесения от внесения связаны с тем, что биоуголь рассматривается, как потенциальный источник токсикантов, вещество способное удерживать тяжелые металлы и подавлять эффективность пестицидов [7, 41, 53].

К однозначно негативным последствиям от внесения биоугля можно отнести снижение эффективности пестицидов (в особенности гербицидов), что может затруднить борьбу с сорняками [41]

Биоуголь может быть носителем различных опасных соединений, таких как тяжелые металлы (Cd, Cu, Cr, Ni, Zn), ПАУ, ПХДД и ПХДФ, а также другие токсины, такие как летучие органические соединения, ксиленолы, крезолы, акролеин и формальдегид [42].

Конденсаты на поверхности биоуглей могут содержать такие соединения, как полициклические ароматические углеводороды, крезолы,

ксиленолы, формальдегид, акролеин и другие токсичные карбонильные соединения. Биоугли с высоким содержанием летучих веществ, способствует иммобилизации азота и снижению микробной активности, что может подавлять рост растений [22,65]

Остаточные летучие вещества на биоугле, могут быть токсичными для растений. Однако экспериментально установлено, что при увеличении времени пиролиза биоугля эти токсические эффекты исчезали. [53].

Для минимизации возможных рисков от внесения биоугля, использование продукта должно строиться на принципах безопасного и ответственного использования, не причиняющего вреда людям и экосистемам [64]. Так же для предотвращения рисков актуально проведение долгосрочных полевых и лабораторных исследований, значимость проведения которых подымается многими авторами [41,49, 54, 66].

Глава 2. Объекты и методы

2.1 Объекты

2.2 Закладка и схема эксперимента

2.3 Методы

Глава 3. Результаты и обсуждение

3.1 Изменение основных биогенных элементов и значений рН в почвах под воздействием различных биоуглей

3.1.1 Содержание минерального азота в почве

3.1.2 Содержание подвижного фосфора в почве

3.1.3 Содержание подвижного калия в почве

3.1.4 Изменение значений рН

3.2 Изменение концентрации тяжелых металлов в почвах при внесении различных биоуглей

3.2.1 Содержание меди в почве

3.2.2 Содержание цинка в почве

3.2.3 Содержание свинца в почве

3.2.4 Содержание кадмия в почве

3.3 Влияние биоуглей на содержание NPK в викоовсяной смеси

3.3.1 Содержание азота в вико-овсяной смеси

3.3.2 Содержание фосфора в вико-овсяной смеси

3.3.3 Содержание калия в вико-овсяной смеси

3.4 Влияние биоуглей на биомассу вико-овсяной смеси

Закключение

1. В ходе проведенной оценки установлено, что внесение изучаемых биоуглей в агродерново-подзолистую супесчаную почву с разной степенью окультуренности приводило к существенному ($p < 0.05$) увеличению содержания минеральных форм азота, в среднем на 36-57 % по сравнению с контрольным вариантом, что зависело от типа вносимого биоугля, исключением являлся биоуголь из шелухи подсолнечника, внесение которого не привело к статистически значимым изменениям относительно контроля. Для среднеокультуренной почвы лучшим для внесения оказался биоуголь из птичьего помета, тогда как в высокоокультуренных вариантах лучше всего показал себя яблочный жмых, в целом воздействие данных биоуглей мало отличается друг от друга, их можно рекомендовать, если необходимо увеличить содержание минеральных форм азота в почве. При общем характере воздействия, лучшие результаты установлены при внесении биоугля в почвы с более высокой степенью окультуренности.

2. При анализе воздействия биоуглей на изменение подвижных форм фосфора выявлено, что внесение БПП приводило к достоверному ($p < 0.05$) увеличению содержания подвижных форм фосфора на 209 % в почвах СОК и на 51 % соответственно для ВОК, и на 4 % при внесении БЯЖ в почвы ВОК. В остальных вариантах, внесение БЯЖ и БШП не приводило к достоверным изменениям данного биогенного элемента. Лучшие результаты отмечались при внесении биоугля в изначально более бедные почвы средней степени окультуренности. Если необходимо повысить содержание подвижных форм фосфора в почвах, то для этого можно порекомендовать вносить биоугли из птичьего помета.

3. Изучение влияния биоуглей на изменение содержания подвижных форм калия выявило статистически значимое ($p < 0.05$) увеличение его концентрации как в почве СОК - на 436-1139 %, так и в почве ВОК - на 268-403 %. Наилучший результат давал биоуголь из птичьего

помета, причем наибольший отклик отмечался в изначально более бедных почвах средней окультуренности. Следует отметить, что каждый из рассматриваемых биоуглей можно порекомендовать для внесения с целью повышения подвижных форм калия, в данном случае так же следует ориентироваться на воздействие биоугля на другие агроэкологические характеристик.

4. Внесение биоуглей приводило к достоверному снижению ($p < 0.05$) кислотности почвы в среднем на 0.8-1.8 для почв СОК и на 0.4-0.8 для почв ВОК, наиболее сильно снижал кислотность биоуголь из птичьего помета. Следует отметить, что значительное возрастание рН установлено в почвах с изначально более низким значением, 5.4 в почвах СОК, против 6.2 в почвах ВОК. Биоуголь оказывает эффект известкования, что согласуется с ранее проводимыми экспериментами, для известкования супесчаной дерново-подзолистой почвы можно порекомендовать вносить биоуголь из птичьего помета.

5. Оценивая воздействие рассматриваемых биоуглей на макроэлементы и значение рН в почвах, установлен неоднородный характер влияния биоуглей на рассматриваемые показатели, сравниваемые биоугли сильно отличались друг от друга. За исключением воздействия биоугля на изменение содержания минеральных форм азота, биоуголь из птичьего помета имел достоверные ($p < 0.05$) отличия от биоугля из яблочного жмыха и шелухи подсолнечника. Немалую роль так же играло внесение биоугля в почвы с разной степенью окультуренности, за исключением минеральных форм азота, биоуголь лучше воздействовал на среднеокультуренные почвы. По степени рекомендации его для внесения, сравниваемые биоугли можно ранжировать в следующий ряд: биоуголь из птичьего помета (БПП) > биоуголь из яблочного жмыха (БЯЖ) > биоуголь из шелухи подсолнечника (БШП).

6. К концу лабораторного эксперимента как в почве со средней, так и высокой степенью окультуренности установлено существенное увеличение

($p < 0.05$) концентрации меди при использовании биоугля из птичьего помета и яблочного жмыха на 58 и 17 % соответственно для СОК и на 62 и 18 % для ВОК. Внесение биоугля из шелухи подсолнечника не влияло на концентрацию меди в СОК, но увеличивало его содержание на 13 % в ВОК.

7. Как в вариантах СОК, так и в вариантах ВОК, отмечено с увеличением ($p < 0.05$) содержания цинка при внесении биоугля из птичьего помета в среднем на 22-24 %, в тоже время внесение БШП приводило к достоверному снижению концентрации цинка в биоугля в среднем на 3-4 %. Биоуголь БЯЖ не оказывал статистически значимого влияния на изменение концентрации цинка. Влияние окультуренности на полученные результаты было незначительным, существенные изменения наблюдались при внесении непосредственно различных типов биоуглей.

8. Установлено достоверное ($p < 0.05$) увеличение содержания свинца при использовании изучаемых биоуглей - на 5-10 % в вариантах СОК, и на 5-9 % в вариантах ВОК. При этом различия между окультуренностью почв и типами биоуглей были незначительными. Следует отметить, что внесение биоугля способствовало снижению иммобилизации свинца из почвы, основным источником иммобилизации является переход свинца в вико-овсяную смесь. Данное воздействие можно считать благоприятным, так как внесения биоугля переводило токсичные ТМ в менее активную форму, однако данный вопрос мало изучен, требуются дополнительные исследования, в том числе в растениях вико-овсяной смеси.

9. Внесение биоугля из шелухи подсолнечника увеличивало ($p < 0.05$) концентрацию кадмия в среднем на 92 % в СОК и на 90 % в ВОК, схожий, но несколько меньший эффект отмечался при внесении БШП где отмечалось статистически значимое увеличение на 8 % в СОК и на 14 % в ВОК. Внесение БЯЖ приводило к увеличению содержания кадмия на 10 % в СОК, в почвах с высокой степенью окультуренности отмечалось снижения концентрации кадмия на 10 %. Воздействие биоуглей на изменение

концентрации кадмия мало зависело от окультуренности почвы, в целом на конец периода наблюдений, установлены близкие значения.

10. Результаты исследования показали, что биоугли из птичьего помета, яблочного жмыха и шелухи подсолнечника имеют разнонаправленное влияние на иммобилизацию меди, цинка, кадмия и свинца в агродерново-подзолистой супесчаной почве и не могут быть однозначно определены как мелиорантывносимые с целью снижения концентраций тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственного назначения. Установлено, что внесения биоугля в почвы с более низкой степенью окультуренности приводило к большему увеличению содержания мобильных форм тяжелых металлов.

11. Внесение биоугля из птичьего помета в почву СОК приводило к достоверному ($p < 0.05$) увеличению азота в вико-овсяной смеси на 24 %, но в тоже время не приводил к статистически значимым изменениям в ВОК, тогда как внесение БЯЖ давало обратную картину, в почвах ВОК наблюдался рост содержания азота в вико-овсяной смеси на 16 %, внесение БШП приводило к снижению содержания азота в растениях на 15 %.

12. Достоверное ($p < 0.05$) увеличение содержания фосфора в растениях наблюдалось только при выращивании на почвах со средней степенью окультуренности при внесении биоугля из птичьего помета, где наблюдался рост содержания фосфора в среднем на 107 %. В случае высокоокультуренных почв при внесении рассматриваемых биоуглей наблюдалось достоверное ($p < 0.05$) снижение содержания фосфора на 7 %, 9 % и 20 % для БПП, БЯЖ и БШП соответственно.

13. В тоже время при внесении биоуглей отмечалось достоверное ($p < 0.05$) увеличивали содержание калия в растениях на 135-229 %, выращенных на СОК и на 17-49 % на ВОК. При сравнении БПП, БЯЖ и БШП лучшие результаты отмечались в почвах с меньшей степенью окультуренности.

14. Внесение биоугля из птичьего помета приводило к достоверному ($p < 0.05$) увеличению биомассы вико-овсяной смеси на 30 % в почвах СОК, тогда как внесение БЯЖ увеличивало биомассу культуры на 19 %, в тоже время внесение биоугля из шелухи подсолнечника не приводило к статистически значимым изменениям биомассы. Отсутствие достоверных изменений так же наблюдалось при внесении биоугля БПП и БЯЖ в почвы с высокой степенью окультуренности, а внесение БШП приводило к снижению биомассы вико-овсяной смеси на 11 %.

15. Как результат, по степени благоприятного воздействия + на НРКи увеличение биомассы вико-овсяной смеси, сравниваемые биоугли можно ранжировать в следующий убывающий ряд: биоуголь из птичьего помета (БПП) > биоуголь из яблочного жмыха (БЯЖ) > биоуголь из шелухи подсолнечника (БШП). Как и в случае влияния биоуглей на НРК почвы, лучшие результаты отмечались в почвах с более низкой степенью окультуренности.

16. Результаты проведенного исследования указывают на неоднородный характер влияния различных биоуглей на основные агроэкологические свойства, характеризующие плодородие почв. Однако проведенное исследование дополняет сведения о неоднородном влиянии различных типов биоуглей при внесении их в одну почву, подкрепляя представление о том, что для наиболее рационального природопользования для каждой конкретной почвы, целесообразен подбор определенных типов биоуглей. Для более точной оценки влияния исследуемых биоуглей на основные агроэкологические характеристики дерново-подзолистых супесчаных почв, требуются дополнительные долгосрочные полевые эксперименты.

Список использованной литературы

1. Агрохимия.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Колос, 1984.— 304 с
2. Апарин Б.Ф. Почвоведение : учебник для образоват. учреждений сред, проф. образования. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 256 с.
3. Балашов Е.В., Рижия Е.Я. Влияние биоугля на плотность сложения и водоудерживающую способность супесчаной дерново-подзолистой почвы разной степени окультуренности // Агрофизика. 2020. № 2. С. 1-6.
4. 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 Казанского технологического университета. 2016. №11. С. 185–189.
5. Гришина Л.А., Самойлова Е.М. Учет биомассы и химический анализ растений. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1971. 99 с.
6. Гурова Т.А. Основные направления исследований по применению биоугля в сельском хозяйстве РФ // Материалы трудов конференции: Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду, Санкт-Петербург, АФИ, 08.12.2020. С. 21-24.
7. Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А. Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // Труды КарНЦ РАН. 2020. №3. С. 31–44.
8. Евтефеев Ю.В., Казанцев Г.М. Основы агрономии: учебное пособие / Ю. В. Евтефеев, Г.М. Казанцев. — М. : ФОРУМ, 2013. — 368 с.
9. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука, 1991. 152 с.
10. Зауэр Е.А. Современные автоматические CHNS/O/X-анализаторы органических соединений // Аналитика и контроль. 2018. № 1. С. 6-19.

11. Копщик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение, 2014. №. 7. С. 851-851.
12. Кулагина В.И., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Рязанов С.С., Сунгатуллина Л.М., Забелкин С.А., Кольцова Т.Г. (2019) Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия // Аграрный научный журнал. № 1. С. 16-20.
13. Методы определения тяжелых металлов в разбавленных сточных водах. М.: Колос, 1989. 123 с.
14. Минеев В.Г. Агрохимия Учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М: Изд-во МГУ, КолосС, 2004. — 720 с.
15. Минеев В.Г. Экологические проблемы агрохимии / В.Г. Минеев. М., МГУ, 1988. 284 с.
16. Мухина И.М., Дурова А.С. Влияние биоугля на биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и эффективность использования растениями питательных веществ // Агрофизика 2017 № 1. 2017. №1. С. 26–35.
17. Правила охраны почв в Санкт-Петербурге (Вторая редакция): Российский геоэкологический центр, филиал ФГУГП «Урангео» (Горький А.В., Потифоров А.И.); ФГУЗ «Центр эпидемиологии и гигиены в г. СанктПетербург» (Бек И.М., Ямсон В.А.), Санкт-Петербург, 2006.
18. Рижия Е.Я., Хомяков Ю.В., Мухина И.М., Москвин М.А., Гурова Т.А. Почвенно-биологические процессы в дерново-подзолистой супесчаной почве с биоуглем // Агрофизика. 2019. № 3. С. 26-32.
19. Седых В.А., Кашанский А.Д., Хими́на Е.Г., Карауш П.Ю. Изменение подвижности тяжёлых металлов в дерново-подзолистых почвах в зависимости от степени их гумусированности и применения высоких доз органических удобрений // Известия ТСХА. 2011. № 3. С. 1–8.

20. Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Попеня М.В, Изменение форм нахождения кадмия, свинца и урана после добавления биоугля в почвы. Журнал Белорусского государственного университета. 2021. №1. С. 40–51.
21. Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Zhang M., Bolan N., Mohan D. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review // *Chemosphere*. 2014. no. 99. P. 19–33.
22. Atkinson C.J., Fitzgerald J.D., Hips N.A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review // *Plant Soil*. 2010. no 337(1). P. 1–18.
23. Babalola, Oni., Oziegbe., Olubukola., Olawole., Obembe. Significance of biochar application to the environment and economy // *Annals of Agricultural Sciences*. 2020. no. 64(2). P. 222-236.
24. Biederman L.A., Harpole W.S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis // *GCB Bioenergy*. 2012, no. 5(2). P. 202-214.
25. Borchard, N., Michael. S., Cayuela. M., Kammann. C., Wrage-Mönnig. N., Estavillo. J., Fuertes-Mendizábal. T., Sigua. G., Spokas. K., Ippolito. J., Novak. Jeff. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis // *Science of The Total Environment*. 2018. no.651. P. 2354–2364.
26. Bousdra T., Papadimou S.G., Golia E.E. The use of biochar in the remediation of Pb, Cd, and Cu-contaminated soils. The Impact of biochar feedstock and preparation conditions on its remediation capacity // *Land*. 2023. no. 12(3). P. 383.
27. Carbone M.S., Still C.J., Ambrose A.R., Dawson T.E., Williams A.P., Boot C.M., Schaeffer S.M., Schimel J.P. Seasonal and episodic moisture controls on plant and microbial contributions to soil respiration // *Oecologia*. 2011. no. 167(1). P. 265-278.

28. Cayuela. M., Van Zwieten. L., Singh. B., Jeffery. S., Roig. A., Sanchez-Monedero. M.A. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2014. no. 191. P. 5–16.
29. Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic Values of Green Waste Biochar as a Soil Amendment // *Australian Journal of Soil Research.* 2007. no. 45(8). P. 629-634.
30. Chatterjee R., Sajjadi B., Chen W-Y., Mattern D.L., Hammer N., Raman V. and Dorris A. Effect of Pyrolysis Temperature on Physico Chemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO₂ Adsorption // *Front. Energy Res.* 2020. no. 8. P. 85.
31. Chen G., Gui J., Qing C-X., Huang D-L., Liao F and Yang. Evaluating the impact of biochar on biomass and nitrogen use efficiency of sugarcane using ¹⁵N tracer method // *Frontiers in Agronomy.* 2022. no. 4. 989993.
32. Chintala. R., Mollinedo. J., Schumacher. T., Malo. D., Julson. J. Effect of Biochar on Chemical Properties of Acidic Soil // *Archives of Agronomy and Soil Science.* 2013. no. 60. P. 393-404.
33. Clough. T., Condron. L.M., Kammann. C., Müller. C. A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics // *Agronomy.* 2013. no. 3. P. 275-293.
34. Deng Q., Hui D., Chu G., Han X., Zhang Q. Rain-induced changes in soil CO₂ flux and microbial community composition in a tropical forest of China // *Scientific Reports.* 2017. no. 7. 5539.
35. Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z., Tan X., Huang X., Zeng G., Zhou L., Zheng B. Biochar to improve soil fertility. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2016. no. 36(2). P. 36
36. Fungo B., Guereña D., Thiongo M., Lehmann J., Neufeldt H., Kalbitz K. N₂O and CH₄ emission from soil amended with steamactivatedbiochar // *J Plant Nutr Soil Sci.* 2014 no. 177 P. 34–38.
37. Ghorbani M., Asadi H., Abrishamkesh S. Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2019. no. 7(3). P. 258–265.

38. Glaser B., Lehmann J., Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review // *Biology and fertility of soils*. 2002. no. 35. P. 219–230.
39. Guo M., He Z., Uchimiya S. M. Introduction to biochar as an agricultural and environmental amendment. In *Agricultural and Environmental Applications of Biochar // Advances and Barriers*. 2016. no. 63. P. 1–14.
40. Haider G., Koyro H.W., Azam F., Steffens D., Müller C., Kammann C. Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant-soil moisture relations // *Plant Soil*. 2014. no. 395. P. 141–157.
41. Hussain M., Farooq M., Nawaz A., Al-Sadi A., Solaiman Z., Alghamdi S., Jawad A., Ok Y.S., Siddique K. Biochar for crop production: potential benefits and risks. // *Journal of Soils and Sediments*. 2017, no. 17(2). pp. 685-716.
42. Kim H.S., Kim K.R., Kim H.J., Yoon J.H., Yang J., Ok Y., Owens G., Kim K.H. Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in agricultural soil // *Environ Earth Sci*. 2015. no. 74. P. 1249–1259.
43. Lebrun M., Miard F., Nandillon R. Hattab-Hambli N., Léger J. C., Scippa G. S., Morabito D., Bourgerie S. Influence of biochar particle size and concentration on Pb and As availability in contaminated mining soil and phytoremediation potential of Poplar assessed in a mesocosm experiment // *Water Air Soil Pollut*. 2021. no. 232. P. 3.
44. Li M., Messele S.A., Boluk Y., El-Din M.G. Isolated cellulose nanofibers for Cu (II) and Zn (II) removal: performance and mechanisms // *Carbohydrate Polymers*. 2019. no. 221(1) P. 231-241.
45. Libra J. A., Ro K. S., Kammann C. et al. // *Biofuels*. 2011. no. 2(1). P. 89–124.
46. Inyang M., Dickenson E. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: a review // *Chemosphere*. 2015. no. 134. P. 232–240

47. Melo L.C.A., Puga A.P., Coscione A., Beesley L., Abreu C.A., Camargo O. A. Sorption and desorption of cadmium and zinc in two tropical soils amended with sugarcane-straw-derived biochar // *J. Soil. Sediment.* 2016. no. 16, P. 226–234.
48. Jeffery S., Verheijen F., Velde M., Bastos A. A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis // *Agriculture Ecosystems & Environment - AGR ECOSYST ENVIRON.* 2011. no. 144. P. 175-187.
49. Jha P., Biswas A., Rao A. Biochar in Agriculture – Prospects and Related Implications // *Current science.* 2010. no. 99(9). P. 1218-1225.
50. Jiang J., Xu R.K., Jiang T.Y., Li Z. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol // *J Hazard Mater.* 2012. no. 229(230). P. 145–150.
51. Jien. S., Wang. C. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil // *Catena.* 2014. no. 110. P. 225–233.
52. Johannes L., Annette C., Caroline A.M., Claudia K., Dominic W., James E.A., Maria L.C., Camps-Arbestain. M., Thea W. Biochar in climate change mitigation // *Nature Geoscience.* 2021. no. 14. P. 883–892.
53. Joseph S., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe P., Chia C.H., Hook J., Van Zwieten L., Kimber S., Cowie A., Singh, B.P., Lehmann J., Foidl, N., Smernik R.J., Amonette, J.E. An investigation into the reactions of biochar in soil. // *Aust. J. Soil Res.* 2010. no. 48. P. 501–515.
54. Joseph S., Cowie A., Van Zwieten L., Bolan N., Budai A., Buss W., Cayuela M., Graber E., Ippolito J., Kuzyakov Y., Luo Y., Ok Y.S., Palansooriya K.N., Shepherd J., Stephens S., Weng Z., Lehmann J. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar // *GCB Bioenergy.* 2021. no. 13. P. 1731-1764.
55. Mehmood. S., Rizwan. M., Bashir, S., Ditta. A., Aziz. O., Yong. L., Dai. Z., Akmal. M., Ahmed. W., Adeel. M., Imtiaz. M., Tu. M. Comparative Effects of Biochar, Slag and Ferrous–Mn Ore on Lead and Cadmium Immobilization in Soil

// Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2018. no. 100. P. 286-292.

56. Mukhina I.M., Rizhiya E.Y., Bankina T.A. Biochar effect on nutrients availability to barley // Environmental Research, Engineering and Management. 2020. no. 76(2). P. 43-53.

57. Park J.H., Choppala G.K., Bolan N.S., Chung J.W., Cuasavathi T. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals // Plant Soil. 2011. no. 348. P. 439–451.

58. Phillips, C. L. et al. Can biochar conserve water in Oregon agricultural soils? Soil Till. Res. 198, 104525 (2020).

59. Puga. Aline., Abreu. Cleide., Melo. Leônidas., Beesley. L. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium // Journal of Environmental Management. 2015. no. 159. P. 86-93.

60. Qian, L. et al. Biochar compound fertilizer as an option to reach high productivity but low carbon intensity in rice agriculture of China // Carbon Manage. 2014. no. 5. P. 145–154.

61. Rajapaksha A.U., Vithanage M., Zhang M., Ahmad M., Mohan D., Chang S.X., Ok Y.S. Pyrolysis condition affected sulfamethazine sorption by tea waste biochars // Bioresour Technol. 2014. no. 166. P. 303–308.

62. Rajapaksha A.U., Ahmad M., Vithanage M., Kim K.R., Chang J., Lee S., Ok. Y.S. The role of biochar, natural iron oxides, and nanomaterials as soil amendments for immobilizing metals in shooting range soil // Environ Geochem Health. 2015. no. 37. P. 931–942.

63. Saletnik B., Zagula G., Bajcar M., Tarapatsky M., Bobula G., Puchalski C. Biochar as a Multifunctional Component of the Environment. Review // Appl. Sci. 2019. no. 9(6). 1139.

64. Shackley. S., Ibarrola E.R., Hopkins. D., Hammond. J. Biochar Quality Mandate (BQM) version 1.0. 2014 British Biochar Foundation.

65. Spokas K.A., Novak J.M., Venterea R.T. Biochar's role as an alternative N fertilizer: ammonia capture // *Plant Soil*. 2012. no. 350. P. 35–42.
66. Srivastava A. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review // *Applied Soil Ecology*. 2017. no. 119, P. 156-170.
67. Sui. F., Zuo. J., de. C., Li. L., Pan. G., Crowley. D. Biochar effects on uptake of cadmium and lead by wheat in relation to annual precipitation: a 3-year field study // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. no. 25. P. 3368-3377.
68. Sun J., Fan Q., Ma J., Cui L., Quan G., Yan J., Wu L., Hina K., Abdul B., Wang H. Effects of biochar on cadmium (Cd) uptake in vegetables and its natural downward movement in saline-alkali soil *Environ // Pollut. Bioavailab*. 2020. no. P. 36-46.
69. 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. no. 327. P. 235–246.
70. Wu. M., Feng. Q., Sun. X., Wang. H., Gielen. G., Wu. W., Rice (*Oryza sativa* L) plantation affects the stability of biochar in paddy soil // *Sci. Rep*. 2015. no. 5. 10001.
71. Wu P., Cui P.X., Fang G.D., Wang Y., Wang S.Q., Zhou D.M., Zhang W., Wang Y.J. Biochar decreased the bioavailability of Zn to rice and wheat grains: Insights from microscopic to macroscopic scales // *Sci Total Environ*. 2018. no. 621. P. 160-167.
72. Xu X., Cao X., Zhao L., Hailong W., Hongran Y., Bin G. Removal of Cu, Zn, and Cd from aqueous solutions by the dairy manure-derived biochar // *Environ SciPollut Res*. 2013. V. 20. P. 358–368.
73. Xu M., Shang H. Contribution of soil respiration to the global carbon equation // *Journal of Plant Physiology*. 2016. no. 203. P. 16-28.

74. Zhao N., Lehmann J., You F. Poultry waste valorization via pyrolysis technologies: economic and environmental life cycle optimization for sustainable bioenergy systems // ACS Sustain. Chem. Eng. 2020. no. 8. P. 4633–4646.