

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЕЙ НА БИОМАССУ ВИКО-ОВСЯНОЙ СМЕСИ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

Д. М. Костецкий

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79

E-mail: dan-kost@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2023, принята к печати 13.03.2023

Сравнительный анализ влияния внесения биоуглей на биомассу растений вико-овсяной смеси и на изменение содержания основных питательных элементов в данных растениях проведен в рамках 40-дневного вегетационного лабораторного эксперимента на дерново-подзолистой супесчаной почве, различающейся по степени окультуренности. Использовались три вида биоуглей: биоуголь из птичьего помета, шелухи подсолнечника и яблочного жмыха, которые были произведены методом быстрого пиролиза при 400°C. Эксперимент проводился в вегетационных сосудах, которые находились под светоустановкой с 16-часовым световым режимом. Учет биомассы и определение содержания в растениях азота, фосфора и калия проводились по стандартным методикам. В результате проведенного эксперимента установлено, что на среднеокультуренной почве биоугли из птичьего помета и яблочного жмыха достоверно ($p < 0,05$) увеличивали биомассу вико-овсяной смеси на 30% и 19% соответственно относительно контроля, а биоуголь из шелухи подсолнуха не влиял на данный показатель. На высокоокультуренной почве отмечено достоверное ($p < 0,05$) снижение биомассы растений при внесении биоугля из шелухи подсолнечника на 11% по сравнению с контролем, а два других вида биоугля не влияли на биомассу вико-овсяной смеси. В большинстве вариантов биоугли не влияли на содержание азота в растениях, но способствовали увеличению содержания калия. Повышение содержания фосфора наблюдалось только у растений, выросших на почвах со средней степенью окультуренности при добавлении биоугля из птичьего помета. Для уточнения полученных данных необходимо проведение полевых исследований.

Ключевые слова: окультуренность, биоуголь, биомасса, вико-овсяная смесь, питательные элементы.

EFFECT OF BIOCHARS ON VETCH-OAT BIOMASS ON SOD-PODZOLIC SOIL

D. M. Kostetskiy

Russian State Hydrometeorological University (RSHU)

79, Voronezhskaya St., St. Petersburg

E-mail: dan-kost@mail.ru

A comparative analysis of the effect of biochar application on the plant biomass of the vetch-oat mixture and on the content of the main nutrients in these crops was carried in a 40-day laboratory experiment on sod-podzolic sandy loamy soil, differing in the degree of fertility. Three types of biochars were used: biochar made of bird droppings, sunflower husks and apple pomace, which were produced by fast pyrolysis at 400°C. The experiment was carried out in vessels placed under a light installation with a 16-hour light regime. Accounting for the crop biomass and determining the content of nitrogen, phosphorus and potassium in plants were carried out according to standard methods. As a result of the experiment, it was found that biochar made of bird droppings and apple pomace significantly ($p < 0.05$) increased the biomass of the vetch-oat mixture by 30% and 19%, respectively, compared to the control, on soil with medium fertility, and biochar made of sunflower husks did not affect this parameter. On a highly fertile soil, a significant ($p < 0.05$) decrease in plant biomass by 11% compared with the control was noted under the influence of biochar made of sunflower husks, and the other two types of biochar did not affect the biomass of the vetch-oat mixture significantly. In most of the treatments, the biochars did not affect the nitrogen content in the plants, but contributed to an increase in the plant potassium content. An increase in the plant phosphorus content was observed only in plants grown on the soil with medium fertility with the application of biochar made of bird droppings. Field studies are required to clarify the obtained results.

Keywords: soil fertility, biochar, biomass, vetch-oat mixture, nutrients.

ВВЕДЕНИЕ

Производство и последующее использование биоугля из органических отходов можно считать одним из перспективнейших направлений в области восстановления или улучшения основных агроэкологических характеристик почв (Соколик и др., 2015; Chan et al., 2007; Jeffery et al., 2011; Hussain et al., 2017; Saletnik et al., 2019; Joseph et al., 2021), а также в решении ряда проблем, связанных с утилизацией

органических отходов (Соколик и др., 2015; Григорьян и др., 2016; Ding et al., 2016; Saletnik et al., 2019; Joseph et al., 2021). Биоуголь имеет потенциально широкие перспективы применения в качестве мелиоранта для повышения почвенного плодородия (Мухина, Дурова, 2017; Дубровина и др., 2020; Ding et al., 2016; Saletnik et al., 2019). Не менее перспективно применения биоугля для рекультивации нарушенных земель (Srivastava, 2017).

Биоуголь может производиться из биомассы различного происхождения (Григорьян и др., 2016; Chan et al., 2007; Ding et al., 2016; Srivastava, 2017; Saletnik et al., 2019; Joseph et al., 2021). Установлено, что свойства биоугля напрямую зависят от исходного сырья, а также от условий технологического процесса, главным образом температуры и скорости пиролиза (Jha et al., 2010; Ding et al., 2016; Saletnik et al., 2019; Joseph et al., 2021). Разнообразие потенциального сырья и широкая вариативность условий производства продукта приводят к тому, что получаемые биоугли значительно различаются по своим свойствам (Jeffery et al., 2011; Ding et al., 2016; Joseph et al., 2021). Как следствие, их влияние на плодородие почв и урожайность различных сельскохозяйственных культур может быть весьма разнообразным (Jha et al., 2010; Ding et al., 2016; Hussain et al., 2017).

Существует риск потенциального негативного или неоднозначного воздействия биоугля на агроэкологическое состояние почв и рост растений (Григорьян и др., 2016; Ding et al., 2016; Hussain et al., 2017). Если такой риск имеется, он должен быть превентивно изучен в лабораторных условиях относительно различных видов биоугля, конкретных почв и сопутствующих климатических условий (Дубровина, 2020; Ding et al., 2016; Hussain et al., 2017). В случае, если результаты лабораторных экспериментов подтверждают наличие риска, то

Таблица 1. Агрохимическая характеристика пахотных горизонтов среднеокультуренной (СрОк) и высокоокультуренной (ВысОк) дерново-подзолистой супесчаной почвы

Показатели/варианты	СрОк	ВысОк
Пахотный горизонт, глубина в см	0–24	0–30
Содержание физической глины (частицы < 0,01), %	13,7	16,2
pH _{KCl}	5,4±0,27	6,2±0,15
C _{общ} , %	1,69±0,21	2,93±0,38
N _{общ} , %	0,16±0,07	0,27±0,09
N-NO ₃ (мг кг ⁻¹)	11,3±0,9	16,2±1,3
N-NH ₄ (мг кг ⁻¹)	5,4±0,7	11,3±0,5
Доступный P ₂ O ₅ (мг кг ⁻¹)	265±24	435±37
Подвижный K ₂ O (мг кг ⁻¹)	132±48	356±31

Таблица 2. Химическая характеристика биоуглей

Варианты	C _{общ} , %	N _{общ} , %	H, %	O, %	pH (H ₂ O)	W _{гв} , %	Зольность, %
БПП	82,96	1,05	1,43	3,8	7,98	2,78	12,19
БЯЖ	72,51	0,46	1,39	6,1	7,86	1,37	12,05
БШП	78,62	0,94	1,88	5,7	8,17	1,82	18,02

Примечание: БПП – биоуголь из птичьего помета; БЯЖ – биоуголь из яблочного жмыха; БШП – биоуголь из шелухи подсолнечника; W_{гв} – гигроскопическая влажность биоугля.

При закладке лабораторного эксперимента в вегетационные сосуды (высота – 28,5 см, диаметр – 21 см, площадь = 346 см²) помещалось по 2 кг сухой почвы, просеянной через сито с ячейками 8 мм. В каждый сосуд с почвой добавлялась дистиллированная вода для достижения влажности, соответствующей наименьшей влагоемкости почвы (21% и 24% для СрОк и ВысОк соответственно).

Почва прединкубировалась в сосудах в течение одной недели с целью достижения равновесного состояния микробного сообщества. Влажность почвы поддерживалась на заданном уровне посредством ежедневного полива. Далее в сосуды с почвой вносились исследуемые биоугли из расчета 20 т га⁻¹ и

весьма актуальным является проведение долгосрочных полевых исследований (Jha et al., 2010; Hussain et al., 2017; Srivastava, 2017; Joseph et al., 2021).

В данном исследовании изучались биоугли из птичьего помета, шелухи подсолнечника и яблочного жмыха, которые в нашей стране ранее не применялись и являются новым продуктом, поэтому перед их внесением в почвы необходимо проведение предварительного тестирования.

Цель исследования – провести сравнительный анализ влияния различных биоуглей на формирование биомассы и изменение содержания основных питательных элементов (азота, фосфора, калия) в растениях вико-овсяной смеси.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для лабораторного эксперимента использовались образцы пахотных горизонтов дерново-подзолистой супесчаной почвы, различающиеся по степени окультуренности, отобранные в агрофизическом стационаре Меньковского филиала ФГБНУ АФИ (д. Меньково, Гатчинский район, Ленинградская область). Время отбора образцов почвы – конец апреля 2021 г.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

Агрохимическая характеристика исходных образцов почвы представлена в табл. 1. Сравнительная характеристика элементного состава исследуемых биоуглей приведена в табл. 2.

+ биоуголь из шелухи подсолнечника. Повторность каждого варианта – 3-кратная.

Химический анализ биоугля выполнялся на элементном анализаторе Euro EA3028-НТ (EuroVector) для одновременного определения С, Н, N. Кислотные показатели почвы (рН сол) определялись по ГОСТ 26483-85, гранулометрический состав – по ГОСТ 12536-2014, фосфор подвижный – по ГОСТ Р 54650-2011, калий подвижный – по ГОСТ Р 54650-2011, органическое вещество – по ГОСТ 26213-91. Содержание азота, фосфора и калия в сухой биомассе растений определялось путем мокрого озоления салицил-серной и хлорной кислотами. Отбор и анализ биомассы осуществлялись в соответствии с методическими указаниями Гришиной и Самойловой (1971).

Статистический анализ проводился при помощи программы Microsoft Excel. Для сравнительного

Таблица 3. Биомасса вико-овсяной смеси (г_{с.в} 100 растений⁻¹).

Варианты	Контроль	БПП	БЯЖ	БШП	Среднее фактор А (НСР _{0,05} 1,14)
СрОк (НСР _{0,05} 2,27)	19,59	25,55	23,32	20,38	22,21
ВысОк (НСР _{0,05} 1,82)	28,41	28,76	27,77	25,19	27,53
Среднее фактор В (НСР _{0,05} 0,57)	24,00	27,15	25,54	22,79	

Сравнение частных средних АВ (НСР_{0,05} 2,29)

Примечание: г_{с.в} – граммы сухого вещества; БПП – биоуголь из птичьего помета; БЯЖ – биоуголь из яблочного жмыха; БШП – биоуголь из шелухи подсолнечника; СрОк – почва со средней степенью окультуренности; ВысОк – почва с высокой степенью окультуренности; НСР – наименьшая существенная разница.

Результаты проведенного статистического анализа свидетельствуют о достоверных различиях в биомассе растений ($p < 0,05$) между анализируемыми вариантами почв с разной степенью окультуренности. На ВысОК почве биомасса растений была в среднем в 1,2 раза выше, чем на СрОк.

При анализе результатов исследования установлено, что на СрОк почве внесение БПП и БЯЖ достоверно ($p < 0,05$) увеличивало биомассу вико-овсяной смеси к концу эксперимента: при добавлении БПП наблюдалось увеличение биомассы исследуемой культуры на 30%, а при добавлении БЯЖ – на 19% относительно контроля. Внесение БШП достоверно не влияло на изменение биомассы растений. На ВысОк почве добавление биоуглей из БПП и БЯЖ не привело к достоверным изменениям биомассы растений, тогда как при внесении БШП наблюдалось достоверное ($p < 0,05$) снижение биомассы исследуемых растений на 11%.

Путем мета-анализа, проведенного С. Джеффри с соавт. (Jeffery et al., 2011), в большинстве исследований установлено, что внесение в почву биоугля в целом благоприятно влияет на биомассу различных культур, увеличивая ее в среднем на 10%. В то же время результаты мета-анализа, проведенного С. Джозефом с соавт., показали, что среднее увеличение урожайности различных культур составляет 10–42% (Joseph et al., 2021). В обзорной статье Т. А. Гуровой (2020) описаны результаты исследований, которые

анализа полученных результатов использовалась величина наименьшей существенной разницы (НСР_{0,05}) для двухфакторной модели, где за фактор А взяты сравниваемые почвы, а за фактор В – исследуемые биоугли. В результате были получены три значения НСР для сравнения исследуемых показателей: для сравниваемых почв (НСР_{0,05}А), для сравниваемых биоуглей (НСР_{0,05}В), а также достоверность различий между средними значениями варианта в совокупности (частные средние НСР_{0,05}АВ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте учитывались биомасса надземной части растения и количественное содержание в ней элементов минерального питания. Средние показатели биомассы растений в конце эксперимента в пересчете на 100 растений из каждого сосуда представлены в табл. 3.

выявили, что в условиях модельно-полевого опыта заделка древесного биоугля в дерново-подзолистую тяжелосуглинистую почву залежи снижала урожайность однолетних культур (вико-овсяной смеси) на 10%, но в последующие годы увеличивала урожайность многолетних трав на 12%. И. А. Дубровина с соавт. (2020) указывают на усиление линейного роста, повышение продуктивности надземной биомассы ячменя и содержания протеина в зеленой биомассе. В исследовании И. М. Мухиной и А. В. Дуровой (2017) отмечается, что при внесении биоугля биомасса ячменя с подсевом многолетних трав на дерново-подзолистой супесчаной почве со средней и высокой степенью окультуренности увеличивается на 6% и 4% соответственно по сравнению с контролем. В обзорной работе М. Хуссейн с соавт. (2017) представлены результаты исследований, свидетельствующие об увеличении биомассы и урожайности зерна твердой пшеницы до 30%. Также в ходе ранее проведенных экспериментов наблюдалось, что внесение биоугля в почвы с низкой степенью окультуренности давало лучшие результаты по сравнению с аналогичными почвами с высокой степенью окультуренности (Hussain et al., 2017; Mukhina et al., 2020).

Показатели содержания азота в растениях вико-овсяной смеси во всех исследуемых вариантах опыта представлены в табл. 4.

Таблица 4. Содержание азота ($\text{мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$) в растениях вико-овсяной смеси

Варианты	Контроль	БПП	БЯЖ	БШП	Среднее фактор А (НСР _{0,05} 69,25)
СрОк (НСР _{0,05} 21,71)	213,3	265,24	197,87	196,84	218,31
ВысОк (НСР _{0,05} 27,17)	287,27	292,79	332,5	243,31	288,97
Среднее фактор В (НСР _{0,05} 34,63)	250,28	279,01	265,19	220,07	
Сравнение частных средних АВ (НСР _{0,05} 138,51)					

Примечание: $\text{мг}_{\text{с.в}}$ – миллиграммы сухого вещества; БПП – биоуголь из птичьего помета; БЯЖ – биоуголь из яблочного жмыха; БШП – биоуголь из шелухи подсолнечника; СрОк – почва со средней степенью окультуренности; ВысОк – почва с высокой степенью окультуренности; НСР – наименьшая существенная разница.

Результаты проведенного статистического анализа позволили выявить достоверные различия ($p < 0,05$) в содержании азота между растениями, выращенными на почвах с разной степенью окультуренности. У растений, выросших на ВысОк почве ($288,97 \text{ мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$), содержание азота было в среднем в 1,3 раза выше, чем у выросших на СрОк почве ($218,31 \text{ мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$).

На СрОк почве только БПП достоверно ($p < 0,05$) увеличил содержание азота в растениях вико-овсяной смеси относительно контроля (на 24%). Внесение БЯЖ и БШП не влияло на содержание азота в исследуемых растениях. На ВысОк почве внесение БЯЖ достоверно ($p < 0,05$) увеличило содержание азота на 16% по сравнению с контролем, внесение БШП привело к достоверному снижению показателя на 15%, а внесение БПП не оказало существенного влияния на содержание элемента в растениях.

Биоуголь – бедное азотом вещество (Chan et al., 2007; Jha et al., 2010), однако в исследованиях других ученых установлено, что чаще всего внесение биоуглей благоприятно сказывается на накоплении азота в растениях (Biederman et al., 2012). В работе

И. М. Мухиной и А. В. Дуровой (2017) выявлено, что внесение древесного биоугля в дозе 12 т га^{-1} в дерново-подзолистую супесчаную почву со средней степенью окультуренности увеличивало содержание азота в зерне и соломе ячменя на 11% и 12% соответственно по сравнению с контролем, в то время как на почве с высокой степенью окультуренности данный эффект был минимален с незначительным трендом увеличения содержания азота в зерне и соломе ячменя. В работе Г. Чен с соавт. (Chen et al., 2022) показано, что внесение биоугля из стеблей маниоки в дозах 10 и 20 т га^{-1} влияло на содержание азота в сахарном тростнике только при использовании более высокой дозы биоугля: содержание азота увеличилось на 27,27% и 30,40% соответственно на стадии кущения и колошения по сравнению с контролем. В то же время в обзорной работе М. Хуссейн (Hussain et al., 2017) отмечалось отсутствие влияния внесения биоугля на содержание азота в зерне твердой пшеницы.

Показатели содержания фосфора в растениях вико-овсяной смеси для разных вариантов опыта представлены в табл. 5.

Таблица 5. Содержание фосфора ($\text{мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$) в растениях вико-овсяной смеси

Варианты	Контроль	БПП	БЯЖ	БШП	Среднее фактор А (НСР _{0,05} 12,85)
СрОк (НСР _{0,05} 15,96)	47,30	97,69	57,26	46,86	62,28
ВысОк (НСР _{0,05} 7,42)	116,49	108,27	106,22	92,98	105,99
Среднее фактор В (НСР _{0,05} 6,42)	81,89	102,98	81,74	69,92	
Сравнение частных средних АВ (НСР _{0,05} 25,70)					

Примечание: $\text{мг}_{\text{с.в}}$ – миллиграммы сухого вещества; БПП – биоуголь из птичьего помета; БЯЖ – биоуголь из яблочного жмыха; БШП – биоуголь из шелухи подсолнечника; СрОк – почва со средней степенью окультуренности; ВысОк – почва с высокой степенью окультуренности; НСР – наименьшая существенная разница.

В результате проведенного анализа установлены достоверные различия ($p < 0,05$) в содержании фосфора между растениями, выросшими на почвах с разной степенью окультуренности. Среднее содержание фосфора в растениях, выросших на ВысОк почве ($105,99 \text{ мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$), было в 1,7 раз выше, чем у выросших на СрОк почве ($62,28 \text{ мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$).

При анализе воздействия исследуемых биоуглей установлено, что в случае внесения БПП в СрОк почву наблюдалось достоверное ($p < 0,05$) увеличение содержания фосфора в вико-овсяной смеси на 107% относительно контроля, тогда как БЯЖ и БШП достоверно не влияли на изменение содержания фосфора в растениях. При внесении БПП, БЯЖ и БШП в ВысОк почву наблюдалось достоверное ($p < 0,05$)

снижение содержания фосфора в растениях на 7%, 8% и 20% соответственно.

Полученные результаты согласуются с данными ранее проведенных экспериментов других ученых, которые установили, что биоуголь богат фосфором и способствует повышению его содержания в растениях. Так, мета-анализ, проведенный С. Джозефом с соавт. (Joseph et al., 2021), показал, что внесение биоугля увеличивает доступность фосфора растениям в среднем в 4,6 раза. Биоуголь может являться источником доступного для растений фосфора, напрямую или косвенно влияя на поведение фосфора в почве через изменение pH, повышение активности почвенных ферментов, формирование органоминеральных комплексов, которые увеличивают растворимость фосфора и изменяют

структуру микробиологических растительных сообществ. В более раннем исследовании отмечается влияние внесения биоугля из птичьего помета на увеличение в почве доступного растениям фосфора (Jha et al., 2010). В то же время в другой работе (Мухина, Дурова, 2017) было установлено отсутствие увеличения содержания фосфора как в зерне, так и в соломе ячменя при внесении 12 т га^{-1} древесного биоугля в дерново-подзолистую супесчаную почву со

средней степенью окультуренности. Содержание фосфора в соломе и зерне увеличивалось только при внесении биоугля совместно с мочевиной. В то же время внесение биоугля в почву с высокой степенью окультуренности увеличивало содержание фосфора в соломе ячменя в 1,4 раза.

Данные о содержании калия в растениях вико-овсяной смеси представлены в табл. 6.

Таблица 6. Содержание калия ($\text{мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$) в растениях вико-овсяной смеси

Варианты	Контроль	БПП	БЯЖ	БШП	Среднее фактор А (НСР _{0,05} 405,11)
СрОк (НСР _{0,05} 187,57)	306,45	1009,30	817,70	721,59	713,76
ВысОк (НСР _{0,05} 101,93)	785,55	1172,62	1052,54	915,82	981,63
Среднее фактор В (НСР _{0,05} 202,5)	546,00	1090,96	935,12	818,71	
Сравнение частных средних АВ (НСР _{0,05} 801,22)					

Примечание: $\text{мг}_{\text{с.в}}$ – миллиграммы сухого вещества; БПП – биоуголь из птичьего помета; БЯЖ – биоуголь из яблочного жмыха; БШП – биоуголь из шелухи подсолнечника; СрОк – почва со средней степенью окультуренности; ВысОк – почва с высокой степенью окультуренности; НСР – наименьшая существенная разница.

При внесении биоуглей в СрОк почву наблюдалось достоверное ($p < 0,05$) увеличение содержания калия в растениях: на 229% в случае использования БПП, на 167% – БЯЖ, на 135% – БШП. В растениях, выросших на ВысОк почве, при внесении биоуглей содержание калия было сходным с аналогичными вариантами со СрОк почвой. При этом содержание калия в растениях контрольного варианта на ВысОк почве ($785,55 \text{ мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$) было в 2,6 раза выше, чем в растениях контрольного варианта на СрОк почве ($306,45 \text{ мг}_{\text{с.в}} 100 \text{ растений}^{-1}$). В вариантах с ВысОк почвой наблюдалось достоверное ($p < 0,05$) увеличение содержания калия в растениях на 49%, 34% и 17% соответственно для БПП, БЯЖ и БШП.

Полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных экспериментов других авторов, которые отмечали, что при внесении биоугля в почву наблюдается увеличение содержания калия в растениях (Biederman et al., 2012). В исследовании И. А. Дубровиной (2020) установлено, что применение биоугля приводит к повышению содержания калия в ячмене. В работе других авторов показано, что внесение биоугля не изменяло общего содержания калия в почве, но обогащало ее водорастворимой и обменной формами, доступными для растений (Кулагина и др., 2019).

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного сравнительного анализа позволили выявить неоднозначное воздействие изучаемых биоуглей на биомассу растений вико-овсяной смеси и на содержание в них основных питательных элементов. Внесение биоуглей из птичьего помета и яблочного жмыха привело к достоверному ($p < 0,05$) увеличению биомассы растений, выращиваемых на среднеокультуренной почве, но не влияло на данный параметр на высокоокультуренной почве. В то же время внесение биоугля из шелухи подсолнечника отрицательно влияло на биомассу растений, выращиваемых на высокоокультуренной почве. Изучаемые биоугли в

большинстве вариантов опыта не влияли на содержание азота в растениях, но способствовали достоверному ($p < 0,05$) увеличению содержания в них калия как на почве со средней, так и с высокой степенью окультуренности. Достоверное ($p < 0,05$) увеличение содержания фосфора в растениях наблюдалось только при их выращивании на почвах со средней степенью окультуренности с внесением биоугля из птичьего помета. В случае с высокоокультуренными почвами при внесении рассматриваемых биоуглей наблюдалось достоверное ($p < 0,05$) снижение содержания фосфора в растениях. Как результат, исследуемые биоугли по степени благоприятного воздействия на биомассу вико-овсяной смеси и содержание в ней основных питательных элементов на дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности можно выстроить в следующий убывающий ряд: биоуголь из птичьего помета (БПП) > биоуголь из яблочного жмыха (БЯЖ) > биоуголь из шелухи подсолнечника (БШП).

Установлено, что внесение биоугля в почвы со средней степенью окультуренности чаще приводило к достоверному увеличению биомассы растений вико-овсяной смеси и повышению содержания в них основных питательных элементов по сравнению с почвой с высокой степенью окультуренности. Также выявлено, что в случае внесения изучаемых биоуглей в высокоокультуренную почву в большинстве вариантов опыта наблюдалось отсутствие или отрицательное воздействие биоугля на изучаемые параметры.

Учет возможных рисков, связанных с внесением биоугля, можно считать одной из важнейших задач. Актуально проведение лабораторных экспериментов для превентивного предотвращения возможных рисков в полевых условиях, поэтому для уточнения полученных данных и последующих рекомендаций по внесению биоуглей необходимы долгосрочные полевые исследования.

Список литературы

- 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.
- 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.
- Гришина Л.А., Самойлова Е.М. Учет биомассы и химический анализ растений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 99 с.
- 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.
- Кулагина В.И., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Рязанов С.С., Сунгатуллина Л.М., Забелкин С.А., Кольцова Т.Г. Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия // Аграрный научный журнал. 2019. № 1. С. 16–20.
- Мухина И.М., Дурова А.С. Влияние биоугля на биологические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и эффективность использования растениями питательных веществ // Агрофизика. 2017. № 1. С. 26–35.
- Соколик Г.А., Овсянникова С.В., Иванова Т.Г., Попеня М.В., Войникова Е.В. Характеристика дерново-подзолистых почв после внесения биоугля // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2015. № 2. С. 87–94.
- Biederman L.A., Harpole W.S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis // GCB Bioenergy. 2012. № 5(2). pp. 202–214. DOI: 10.1111/gcbb.12037
- 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. № 45(8). pp. 629–634. DOI: 10.1071/SR07109
- Chen G., Gui J., Qing C.-X., Huang D.-L., Liao F., Yang L. Evaluating the impact of biochar on biomass and nitrogen use efficiency of sugarcane using ¹⁵N tracer method // Frontiers in Agronomy. 2022. № 4. pp. 989–993. DOI: 10.3389/fagro.2022.989993
- 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 // Agronomy for Sustainable Development. 2016. № 36(2). 36. DOI: 10.1007/s13593-016-0372-z
- 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. № 17(2). pp. 685–716. DOI: 10.1007/s11368-016-1360-2
- 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. № 144. pp. 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015
- Jha P., Biswas A., Rao A. Biochar in Agriculture – Prospects and Related Implications // Current science. 2010. № 99(9). pp. 1218–1225.
- 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. № 13. pp. 1731–1764. DOI: 10.1111/gcbb.12885
- Mukhina I.M., Rizhiya E.Ya., Bankina T.A. Biochar effect on nutrients availability to barley // Environmental Research, Engineering and Management. 2020. № 76(2). pp. 43–53.
- Saletnik B., Zagula G., Bajcar M., Tarapatsky M., Bobula G., Puchalski C. Biochar as a Multifunctional Component of the Environment. Review // Appl. Sci. 2019. № 9(6). 1139. DOI: 10.3390/app9061139
- Srivastava A. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review // Applied Soil Ecology. 2017. № 119. pp. 156–170. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.06.00

References

- Dubrovina I.A., Yurkevich M.G., Sidorova V.A. Vliyaniye biouglya i udobreniy na razvitiye rasteniy yachmenya i agrokhimicheskiye pokazateli dernovo-podzolistykh pochv v vegetatsionnom opyte [Effect of biochar and fertilizers on the development of barley plants and agrochemical indices of sod-podzolic soils in a vegetative experiment] // *Trudy KarNTs RAN*, 2020, no. 3, pp. 31–44.
- Grigor'yan B.R., Grachev A.N., Kulagina V.I., Sungatullina L.M., Kol'tsova T.G., Ryazanov S.S. Vliyaniye biouglya na rost rasteniy, mikrobiologicheskiye i fiziko-khimicheskiye pokazateli malo gumusirovannoy pochvy v usloviyakh vegetatsionnogo opyta [Influence of biochar on plant growth, microbiological and physico-chemical indicators of low-humus soil under the conditions of vegetative experiment] // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, no. 11, pp. 185–189.
- Grishina L.A., Samoylova Ye.M. *Uchet biomassy i khimicheskiy analiz rasteniy* [Biomass accounting and chemical analysis of plants]. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1971, 99 p.

- Gurova T.A. Osnovnyye napravleniya issledovaniy po primeneniyu biouglya v sel'skom khozyaystve RF [Main directions of research on the use of biochar in agriculture of the Russian Federation] // *Materialy trudov konferentsii «Biougol': svoystva, primeneniye v sel'skom khozyaystve, vliyaniye na pochvy, rasteniya i okruzhayushchuyu sredu»*. Saint-Petersburg, ARI, 08.12.2020, pp. 21–24.
- Kulagina V.I., Grachev A.N., Shagidullin R.R., Ryazanov S.S., Sungatullina L.M., Zabelkin S.A., Kol'tsova T.G. Vliyaniye biouglya na strukturu pochvy i sodержaniye form kaliya [Influence of biochar on soil structure and content of potassium forms] // *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*, 2019, no. 1, pp. 16–20.
- Mukhina I.M., Durova A.S. Vliyaniye biouglya na biologicheskiye svoystva dernovo-podzolistoy supeschanoy pochvy i effektivnost' ispol'zovaniya rasteniyami pitatel'nykh veshchestv [The effect of biochar on biological properties of loamy sand spodosol soil and efficiency of nutrients use by plants] // *Agrofizika*, 2017, no. 1, pp. 26–35.
- Sokolik G.A., Ovsyannikova S.V., Ivanova T.G., Popenya M.V., Voynikova Ye.V. Kharakteristika dernovo-podzolistykh pochv posle vneseniya biouglya [Characteristics of sod-podzolic soils after the application of biochar] // *Izvestiya natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk*, 2015, no. 2, pp. 87–94.
- Biederman L.A., Harpole W.S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis // *GCB Bioenergy*. 2012. № 5(2). pp. 202–214. DOI: 10.1111/gcbb.12037
- 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. № 45(8). pp. 629–634. DOI: 10.1071/SR07109
- Chen G., Gui J., Qing C.-X., Huang D.-L., Liao F., Yang L. Evaluating the impact of biochar on biomass and nitrogen use efficiency of sugarcane using ¹⁵N tracer method // *Frontiers in Agronomy*. 2022. № 4. pp. 989–993. DOI: 10.3389/fagro.2022.989993
- 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 // *Agronomy for Sustainable Development*. 2016. № 36(2). 36. DOI: 10.1007/s13593-016-0372-z
- 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. № 17(2). pp. 685–716. DOI: 10.1007/s11368-016-1360-2
- 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. № 144. pp. 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015
- Jha P., Biswas A., Rao A. Biochar in Agriculture – Prospects and Related Implications // *Current science*. 2010. № 99(9). pp. 1218–1225.
- 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. № 13. pp. 1731–1764. DOI: 10.1111/gcbb.12885
- Mukhina I.M., Rizhiya E.Ya., Bankina T.A. Biochar effect on nutrients availability to barley // *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. № 76(2). pp. 43–53.
- Saletnik B., Zagula G., Bajcar M., Tarapatsky M., Bobula G., Puchalski C. Biochar as a Multifunctional Component of the Environment. Review // *Appl. Sci*. 2019. № 9(6). 1139. DOI: 10.3390/app9061139
- Srivastava A. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review // *Applied Soil Ecology*. 2017. № 119. pp. 156–170. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.06.00