УДК 631.8 (571.63)

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-6

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОУГЛЕЙ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И БУМАЖНЫХ ОТХОДОВ

Брикманс А.В.[1]*, Нестерова О.В.[1], Бовсун М. А.[1]

[1]Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

brikmans.av@dvfu.ru*, nesterova.ov@dvfu.ru, bovsun.mal@dvfu.ru

ORCID: 0000-0003-0071-3951, 0000-0002-3463-0962, 0000-0003-1916-3566

Аннотация

Первоначальная оценка базовых свойств биоугля, получаемого из растительных и бумажных отходов (макулатуры) необходима для оценки возможности его применения и эффектов от внесения в почвы. В исследовании оценены свойства биоугля, полученного методом пиролиза из макулатуры, смеси трав и *Saccharina japonica* по методам международного стандарта качества IBI. Пиролиз макулатуры проводился в течение 1 ч при температуре 800С, пиролиз смеси трав и *Saccharina japonica* проводился в течение 1 ч при температуре 500С. Биоуголь из макулатуры имел наименьший выход продукта (31.5 %), наименьшее количество элементов питания (NPK) и наибольшее значение pH (12.47) по сравнению с биоуглем из смеси трав и *Saccharina japonica.* Наибольшее значение элементов питания (NPK) и Сорг (52.42 %) получено для биоугля из смеси трав. Содержание тяжелых металлов в трех видах биоугля не превышает допустимых показателей. При условии использования полученных биоуглей в качестве улучшителей почвы следует иметь осторожность при их внесении в слабощелочные и щелочные почвы, поскольку все три вида биоугля имеют щелочную реакцию среды и способны привести к смещению реакции среды почвы в сторону щелочной реакции. Внесение полученных биоуглей в кислые почвы может снизить кислотность почвы, а также (для биоугля из смеси трав и *Saccharina japonica*) обогатить почвы основными элементами питания растений.

Ключевые слова

Биоуголь, растительные остатки, базовые параметры, выход биоугля.

Введение

Наличие значительных объёмов отходов растительного происхождения в ключевых отраслях экономики, включая лесопромышленный комплекс, сельское хозяйство и сферу коммунальных услуг, актуализирует разработку и реализацию проектов, ориентированных на глубокую переработку получаемых отходов. Одним из перспективных направлений в этой сфере можно считать получение пиролизных продуктов (биоуглей) из растительных отходов для последующего депонирования в почвы, с целью улучшения параметров их плодородия. Основным процессом производства биоугля является пиролиз, осуществляемый в инертной атмосфере при различных температурах и времени процесса (Рижия, 2014; Bridgwater, 2003).

Результаты многочисленных научных исследований подтверждают высокую эффективность применения биоугля в сельском хозяйстве. Установлено его положительное влияние на состояние почвенного покрова, способность поддерживать и восстанавливать почвенное плодородие, а также снижать эмиссию парниковых газов, а значит технология внесения в почвы биоугля, получаемого путём пиролиза растительных отходов, обладает значительным потенциалом для внедрения в различных секторах экономики (Шафигуллина, 2020).

Уже доказаны положительные эффекты от внесения биоугля в почвы и его влияние на их водно-воздушные свойства, значения pH почвенного раствора, почвенную агрегацию, доступность питательных веществ, доступность органического углерода (Lehman, 2015), рост и развитие растений, увеличение урожайности культур и снижение концентраций загрязняющих веществ (Ding, 2016).

Из вышеперечисленных свойств pH является одним из ключевых показателей почвенного плодородия. Отмечается, что внесение биоугля в почву ведет к снижению кислотности почв (Григорьян, 2016; Al-Wabel, 2013; Литвинович, 2016; Laird, 2010).

Другим важным свойством биоугля, влияющим на многие почвенные процессы, которые определяют почвенное плодородие, является порозность почв. Благодаря высокой собственной порозности биоуголь обладает высокой водоудерживающей способностью, влияющей на водно-воздушный режим почвы. Биоуголь способен в значительных количествах поглощать воду, но данное свойство в значительной мере зависит от размера используемой фракции биоугля (Литвинович, 2016). Помимо этого, высокопористая структура биоугля благоприятно влияет на жизнедеятельность

микроорганизмов и микоризных грибов (Мухина, 2017), а в отдельных случаях значительно увеличивает их численность (Григорьян, 2016; Орлова, 2017), что ускоряет процессы гумификации и развития ризосферы.

Благодаря высоким сорбционным свойствам и относительно низкой себестоимости промышленного производства биоуголь активно внедряется в практику рекультивации загрязнённых почв, в частности для иммобилизации тяжёлых металлов. Значительный объём современных научных публикаций, включая исследования, проведённые на почвах Китая (Zhang et al., 2021; Yuan et al., 2025, Chen et al., 2018), подтверждает эффективность данного подхода. Вместе с тем результаты наших исследований свидетельствуют о том, что биоуголь, находясь в почвенной среде, подвергается постепенной деструкции. Данный процесс потенциально способен инициировать высвобождение ранее сорбированных элементов и соединений, что создаёт риск вторичного загрязнения почвы тяжёлыми металлами (Bovsun et al., 2021). В связи с этим возникает объективная необходимость в дополнительных полевых исследованиях, связанных с оценкой скорости деградации биоуглей в почвах. Возможен и другой путь – модификация биоуглей для повышения его химической и биохимической стабильности, что позволит минимизировать риски негативных экологических последствий при его долгосрочном применении в почвенных системах.

В целом, можно говорить о том, что состав и свойства биоуглей будут во многом определяться свойствами сырья, из которого планируется производить биоуголь, а экономический потенциал для масштабного производства зависит от количества и качества отходов, которые планируется использовать для вторичной переработки. В связи с этим целью нашего исследования была оценка базовых параметров биоуглей, полученных из трех видов отходов: макулатуры, смеси скошенных трав и штормовых выбросов морской водоросли *Saccharina japonica.*

Объекты и методы

Объектом исследования является биоуголь, полученный путём среднего и высокотемпературного пиролиза из различного растительного сырья, а именно макулатуры, смеси скошенных трав (сидераты) и морской водоросли *Saccharina japonica*. Сахарина японская (*Saccharina japonica*) относится к виду морских бурых водорослей рода *Saccharina*. Эти водоросли широко культивируется в акваториях, расположенных между побережьями Китая, Японии и Кореи (Аминина и др., 2014). В российской научной практике данный

вид известен как морская капуста, однако сохранилось устаревшее наименование «ламинария японская», поскольку ранее классифицировалась в составе рода Ламинария (*Laminaria*). Условия пиролиза для разного сырья представлены в таблице (табл. 1).

Таблица 1 – Условия пиролиза

№ п/п	Показатели Сырьё	Температура пиролиза, *°C*	Время пиролиза, *ч*
1	Смесь сидератов	500	1
2	Макулатура	800	1
3	*Saccharina japonica*	500	1

В результате пиролиза и выбранного исходного растительного материала полученный биоуголь обладает разным внешним видом (рис.1) и прочностью.

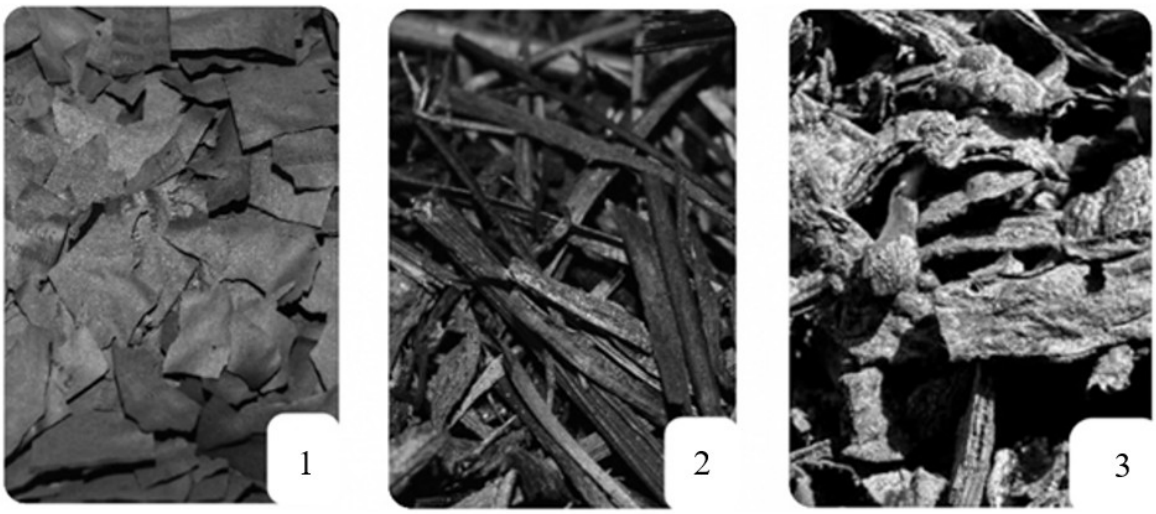

Рис. 1 – Биоуголь, полученный в результате пиролиза различного растительного сырья

(1 – макулатура, 2 – сидераты, 3 – Saccharina japonica).

Для оценки биоугля применяли существующий международный стандарт качества биоуглей и методики по оценке базовых параметров, такие как International Biochar Initiative (IBI) (International Biochar Initiative, 2015). В полученном биоугле определяли прежде всего базовые параметры, влияющие на рост и развитие культурных растений в почве, такие как pH, содержание углерода, азота, фосфора и калия. Щелочные свойства биоугля оценивали согласно методике (Rajkovich et al., 2011) в соотношении биоуголь : вода 1:20, где суспензию тщательно взбалтывали в течение 90 минут, после чего определяли значение pH с использованием pH-метра Mettler-Toledo. Содержание доступных фосфатов определяли с помощью 2% муравьиной

кислоты на спектрофотометре Shimadzu (Wang et al., 2012). Содержание калия определяли по (Enders et al., 2012), с помощью пламенного фотометра. Содержание углерода и азота определяли с применением элементного анализатора Velp по (ASTM D4373-02, 2007). Определение тяжелых металлов в биоуглях проводили с помощью спектрофотометра атомно-абсорбционного AA 6800 (Shimadzu).

Выход биоугля рассчитывался по формуле 1 (Sahoo at. al., 2021):

$$Выходбиоугля\ \% = \frac{W_{биоугля}}{W_{исходногосырья}} \times 100\ \%$$

где W биоугля — масса биоугля (г), W исходного сырья — масса исходных водорослей (г).

Результаты и обсуждение

Растительное сырье, которое подвигается пиролизу, обладает разными физическими и химическими параметрами. К любому исходному растительному сырью предварительно необходимо подобрать температуру пиролиза для оценки максимального выхода биоугля. На выход биоугля влияют следующие факторы: тип и состав исходного сырья, температура процесса, скорость нагрева и время обработки, давление, предварительная обработка сырья.

Макулатура является продуктом вторичной переработки (присутствуют примеси чернил и пр.), в связи с этим была выбрана температура пиролиза в 800 ^{o}C. Выход биоугля при данной температуре составил 31.5 % (табл.2), что говорит о небольшом выходе биомассы по сравнению с материалом, полученном из ламинарии и сидератов, где температура не превышала 500 ^{o}C и выход биоугля составил 42.0–44.0 %.

Таблица 2 – Характеристика биоуглей

Показатели	Макулатура	*Saccharina japonica*	Сидераты
Выход биоугля (W), %	31.50±0.5	42.00±0.5	44.0±0.5
pH	12.47±0.02	10.36 ± 0.02	9.67± 0.02
N, %	0.30±0.5	4.70 ± 0.5	3.20±0.5
P_2O_5, мг/г	н/о	4.30 ± 1.0	8.10± 1.0
K_2O, мг/г	0.01±0.01	19.50 ± 0.01	57.00± 0.01
Сорг,%	36.60±2.00	31.80 ± 2.00	52.40±2.00

Часто значение pH для биоуглей попадает в диапазон от 8 до 12 (Nesterova et al. 2024). Щелочной уровень pH обусловлен тем, что в процессе пиролиза (получения биоугля из органической биомассы без доступа кислорода) образуются щелочные вещества, такие как кальций, натрий и калий. Считается, что благодаря щелочному pH биоуголь может работать как нейтрализатор кислотности на кислых почвах (бурозёмы, темногумусовые подбелы глеевые, подзолистые, дерново-подзолистые, серые лесные) и улучшать их состояние, что способствует росту растений за счет повышения доступности питательных веществ для растений, например фосфатов. Таким образом, уровень pH будет являться одной из ключевых характеристик, определяющих эффективность биоугля в сельском хозяйстве и для улучшения состояния почв.

Полученные нами биоугли (табл. 2) можно отнести к щелочным и сильнощелочным (pH 9.67–12.17). Такие биоугли будут являться хорошим мелиорантом при внесении их в кислые почвы. Однако биоуголь из макулатуры, обладая щелочной pH (более 12.0), может в больших дозах при внесении его в почвы негативно повлиять на растения, в связи с этим необходимо правильно рассчитать выбранную дозу внесения с учетом свойств почв и вида возделываемых культур.

Если рассматривать биоугли как органическое удобрение, производимое не только для российских, но и зарубежных рынков, то такой продукт должен отвечать международному стандарту качества. В настоящее время единственный стандарт качества, принятый в международном сообществе это, международный стандарт International Biochar Initiative, в котором представлены не только параметры качества, но методы их оценки. Получаемому биоуглю, согласно IBI стандарту можно присвоить категории A, B или C в зависимости от назначения. В первую очередь нас интересовала категория A (удобрение), где по одному из базовых параметров «содержанию углерода» существует градация для присвоения ему соответствующего класса, а именно: 1 класс более 60% углерода, 2 класс – не менее 30% и не более 60%, 3 класс – от 10 до 30%. Наши результаты исследований показали, что содержание углерода в биоуглях, полученных из *Saccharina japonica* и макулатуры, не превышает 37%, тогда как максимальное значение данного показателя (52.4%) зафиксировано для биоугля, синтезированного из сидеральных культур. Эти данные позволяют отнести полученные нами биоугли ко II классу.

С углеродом тесно связан такой элемент как азот, который также влияет на уровень плодородия почв. В некоторых органических удобрениях (навоз,

птичий помет и пр.) его содержание может доходить до 1%. Например навоз, приготовленный на соломенной подстилке с разной степенью его разложения может содержать азота от 0.52 до 0.73 % (Минеев, 2004). Содержание общего азота в биоугле из макулатуры составило 0.3% (табл.2), что является низким показателем по сравнению с биоуглем, получаемым из древесного сырья (Nesterova et al. 2024), или биоугля из сидератов и *Saccharina japonica*, где содержание азота составило 3.20–4.70 %, а в биоуглях полученных из ботвы клубники, огурца или томатов содержание азота может доходить до 7.40 % (Nesterova et al. 2024).

Помимо вышеперечисленных важных для плодородия элементов биоуголь может выступать значимым источником фосфора для почв, однако его концентрация и доступность зависят от исходного сырья и технологии производства. Как и ожидалось доступного фосфора в макулатуре обнаружено не было, для сидератов содержание доступных фосфатов составляет около 8 мг/г.

Биоуголь способен влиять и на калийный режим почв, обогащая их доступными для растений формами калия (водорастворимой и обменной). Исследования показали, что содержание обменного калия в макулатуре не превысило 0.01 мг/г. Такие значения являются очень низкими по IBI стандарту. Больше всего калия содержится в биоугле, полученном из сидератов, где выявлено его значение 57.0 мг/г.

Для получения биоугля используют различные отходы растительного сырья, поэтому наряду с их мелиоративным эффектом (Попова и др., 2019), важным аспектом применения биоугля является оценка его экологической безопасности, так как существует риск внесения в почвенный профиль элементов-загрязнителей. Поэтому необходимо учитывать при дальнейшем внесении биоуглей в почвы наличие в нем загрязняющих веществ (Селюкова, 2016).

Особую опасность представляют тяжелые металлы, характеризующиеся высокой атомной массой и выраженным токсическим действием на живые организмы. Накапливаясь в верхних слоях почвы, они угнетают рост растений и через растительную продукцию попадают в организмы животных и человека. Такая миграция разрушает устойчивость агроэкосистем, что требует контроля за любыми вносимыми в почву компонентами (Водяницкий и др., 2012).

Исследуемые нами биоугли имеют разное происхождение и могут содержать в своем составе тяжелые металлы. Макулатура является вторичным продуктом переработки, водоросли в бухтах могут накапливать загрязняющие

элементы из окружающей среды, сидераты, получаемые из скошенных трав городских территорий также могут содержать загрязняющие элементы. В связи с этим полученный биоуголь был проанализирован на содержание тяжелых металлов. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Содержание тяжелых металлов в биоугле, мг/кг

Тяжелые металлы	Макулатура	Сидераты	*Saccharina japonica*	Допустимое содержание тяжелых металлов по IBI
Zn	н/о	113.00	88.20	416-7400
Cr	1.25	н/о	1.16	-
Ni	0.86	0.30	2.08	47-420
Cd	0.30	0.07	0.19	1.4-39
Pb	0.12	0.24	0.27	-
Cu	10.4	3.79	4.09	143-6000
Co	1.91	0.44	1.79	34-100
Mo	0.005	0.02	0.01	5-75
Mg	88	81.00	66.00	-
Fe	226	н/о	115.00	-
Mn	200.0	222.00	275.00	-

*н/о – не обнаружено

Таким образом, согласно международному стандарту IBI превышений по содержанию тяжелых металлов не выявлено, а значит можно использовать полученные нами биоугли для внесения в почву.

Заключение

Исследования показали, что в зависимости от выбранного исходного растительного сырья биоугли будут отличаться друг от друга по базовым параметрам, влияющим на их дальнейшее использование в качестве улучшителя почв.

Биоуголь из макулатуры имел наименьший выход (31.5%) и минимальное содержание питательных веществ (NPK), а также самый высокий уровень pH (12.47) по сравнению с другими образцами. Наиболее высокое содержание питательных веществ (NPK) и органического углерода (52.42%) обнаружено в

биоугле из травяной смеси. Содержание тяжелых металлов во всех трех образцах соответствовало допустимым по международным стандартам нормам.

Таким образом использование полученных биоуглей представляется наиболее перспективными на кислых почвах. Применение биоуглей из сидератов и *Saccharina japonica* будет иметь удобрительные эффекты за счет наличия питательных элементов, что касается биоуглей из макулатуры, то скорее всего это промежуточный продукт, который возможно дополнительно модифицировать, например за счет микробного компонента, чтобы повысить его эффективность для почв или вообще рассмотреть варианты непочвенного применения (добавка к бетону, дорожному покрытию и т.д.).

Благодарности и финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-14-20066) и софинансировании субсидией из краевого бюджета Приморского края (Субсидия №26-810-62470-2-0063-000010, Соглашение № 30-2026-002414) в рамках научного проекта «Биоматрица для рекультивации почв, подверженных загрязнению нефтепродуктами».

Список литературы

1. Аминина Н.М., Вишневская Т.И., Галанин Д.А., Репникова А.Р., Гурулёва О.Н. Характеристика промысловых запасов сахарины японской в заливе Анива (Охотское море). Известия ТИНРО. 2014;178(3):116-123. https://doi.org/10.26428/1606-9919-2014-178-116-123.
2. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. Москва: Типография Россельхозакадемии, 2012. – 305 с.
3. 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.
4. Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Буре В.М. Эмпирические модели водоудерживающей способности песчаной почвы, мелиорируемой различными по размеру фракциями биоугля // Агрономия. Ветеринария и зоотехния. 2016. С. 107-113.

5. Литвинович А.В., Хаммам А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю. Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // Агрохимия. 2016. № 9. С. 39-46.

6. Минеев, В. Г. Агрохимия / В. Г. Минеев. — Москва : Изд-во МГУ, 2004. — 720 с.

7. Мухина И.М., Влияние карбонизированной биомассы на параметры плодородия дерново-подзолистых почв и эмиссию парниковых газов. г. Санкт-Петербург: дис. … канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 2017. 187 с.

8. Орлова Н.Е., Лабутова Н.М., Орлова Е.Е., Банкина Т.А. Биохимические и микробиологические аспекты применения биоугля в качестве мелиоранта почв // Сб. научных трудов, посвященном 95-летию Кубанского ГАУ. 2017. С. 323 - 325.

9. Попова А.Д., Семаль В.А., Брикманс А.В., Нестерова О.В., Колесникова Ю.А., Бовсун М.А. Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // Вестник АГАУ. 2019. №6. С. 57-63.

10. Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Павлик С.В., Балашов Е.В. Применение биоугля в сельском хозяйстве Российской Федерации: Методические рекомендации. Санкт-Петербург: Изд-во Агрофизического научно-исследовательского института РАСХН, 2014. – 39 с.

11. Селюкова С.В. Тяжелые металлы в органических удобрениях // Агрохимический вестник. 2016. №5. С. 47-51.

12. Шафигуллина Л.Р. Различные аспекты применения биочара // Вестник магистратуры. 2020. № 5-5. С. 8-10.

13. Al-Wabel M.I., Al-Omran A., El-Naggar A.H., Nadeem M., Usman A.R.A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes // Bioresuors Technology. 2013. № 131. pp. 374-379. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.165

14. ASTM International (2007) ASTM D4373-02 (2007) Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils http://www.astm.org/Standards/D4373.htm (accessed March 2013).

15. Bovsun M.A., Castaldi S., Nesterova O.V., Semal V.A., Sakara N.A., Brikmans A.V., Khokhlova A.I., Karpenko T.Y. Effect of Biochar on

Soil CO2 Fluxes from Agricultural Field Experiments in Russian Far East // Agronomy. 2021. Vol. 11. 1559. https://doi.org/10.3390/agronomy11081559

16. Bridgwater A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass // Chem. Eng. Journal. 2003. Vol. 91. pp. 87-102. https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0

17. Chen M., Alim N., Zhang Y., Xu N., Cao X. Contrasting effects of biochar nanoparticles on the retention and transport of phosphorus in acidic and alkaline soils // Environmental pollution. 2018. Vol. 239. pp. 562-570. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.050

18. 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. 18 p. https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z

19. Enders, A. and Lehmann, J. (2012) Comparison of wet digestion and dry ashing methods for total elemental analysis of biochar. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 43:1042–1052.

20. International Biochar Initiative (IBI) Biochar Standards. Version 3.1 / International Biochar Initiative. – Washington, DC, 2015. – URL: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V1.1.pdf.

21. Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil // Geoderma. 2010. № 158. pp. 443-449. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013

22. Lehmann J., Kuzyakov Y., Pan G., Ok Y.S. Biochar and the plant-soil interface // Plant Soil. 2015. Vol. 395. pp. 1-5. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2658-3

23. Nesterova O., Brikmans A., Bovsun M., Semal V. Characteristics of the basic properties of biochar obtained from different types of vegetable raw materials // Edelweiss Applied Science and Technology. 2024. Vol. 8. pp. 8254-8259. https://doi.org/10.55214/25768484.v8i6.3780

24. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R., and Lehmann, J. (2011) 20 Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to 21 a temperate soil. Biology and Fertility of Soils 48, 271–284.

25. Sahoo S.S., Vijay V.K., Chandra R., Kumar H., Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo // Cleaner Engineering and Technology. 2021. Vol. 3. 100101. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101.

26. Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., & Bishop, P. (2012). Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. Plant and soil, 357(1-2), 173-187.

27. Yuan X., Ban G., Luo Y., Wang J., Peng D., Liang R., He T., Wang Z. Biochar effects on aggregation and carbon-nitrogen retention in different-sized aggregates of clay and loam soils: A meta-analysis // Soil and Tillage Research. 2025. Vol. 247. 106365. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106365

28. Zhang Ya., Wang J., Feng Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: a review // Catena. 2021. Vol. 202. 105284. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105284

References

1. Aminina N.M., Vishnevskaya T.I., Galanin D.A., Repnikova A.R., Guruleva O.N. Description of Saccharina japonica commercial stock in the Aniva Bay (Okhotsk Sea) //. Izvestiya TINRO. 2014;178(3):116-123. (In Russ.) https://doi.org/10.26428/1606-9919-2014-178-116-123 (in Rus)

2. Vodyanitsky Yu.N., Ladonin D.V., Savichev A.T. Soil pollution by heavy metals. Moscow: Printing House of the Russian Agricultural Academy, 2012. 305 p. (in Rus)

3. Grigoryan B.R., Grachev A.N., Kulagina V.I., Sungatullina L.M., Koltsova T.G., Ryazanov S.S. The effect of biochar on plant growth, microbiological and physico-chemical parameters of low humus soil in the conditions of vegetation experience // Bulletin of Kazan Technological University. 2016. № 11. pp. 185-189. (in Rus)

4. Litvinovich A.V., Hammam A.A.M., Bure V.M. Empirical models of the water-holding capacity of sandy soil reclaimed by various fractions of biochar // Agronomy. Veterinary and animal science. 2016. pp. 107-113. (in Rus)

5. Litvinovich A.V., Hammam A.M., Lavrishchev A.V., Pavlova O.Y. Meliorative properties and fertilizing value of biochar fractions of various sizes (according to laboratory experiments) // Agrochemistry. 2016. No. 9. pp. 39-46. (in Rus)

6. Mineev, V. G. Agrochemistry / V. G. Mineev. - Moscow: Moscow State University Publishing House, 2004. - 720 p. (in Rus)

7. Mukhina I.M. Influence of carbonized biomass on the fertility parameters of sod-podzolic soils and greenhouse gas emissions. St. Petersburg: dis. ... kand. biol. sciences. St. Petersburg, 2017. 187 p. (in Rus)

8. Orlova N.E., Labutova N.M., Orlova E.E., Bankina T.A. Biochemical and microbiological aspects of the use of biochar as a soil meliorant // Collection of scientific papers dedicated to the 95th anniversary of the Kuban State Agrarian University. 2017. P. 323 - 325. (in Rus)

9. Popova A.D., Semal V.A., Brickmans A.V., Nesterova O.V., Kolesnikova Yu.A., Bovsun M.A. The use of biochar as a meliorant and its effect on changes in the physical properties of agricultural soils in the south of Primorsky Krai // Bulletin of the ASAU. 2019. No. 6. pp. 57-63. (in Rus)

10. Rizhiya E.Ya., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Pavlik S.V., Balashov E.V. Application of biochar in agriculture of the Russian Federation: Methodological recommendations. Saint Petersburg: Publishing House of the Agrophysical Research Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2014. 39 p. (in Rus)

11. Selyukova S.V. Heavy metals in organic fertilizers // Agrochemical Bulletin. 2016. №5. pp. 47-51. (in Rus)

12. Shafigullina L.R. Various aspects of biochar application // Bulletin of Magistracy. 2020. № 5-5. pp. 8-10. (in Rus)

13. Al-Wabel M.I., Al-Omran A., El-Naggar A.H., Nadeem M., Usman A.R.A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes // Bioresuors Technology. 2013. № 131. pp. 374-379. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.165

14. ASTM International (2007) ASTM D4373-02 (2007) Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils http://www.astm.org/Standards/D4373.htm (accessed March 2013).

15. Bovsun M.A., Castaldi S., Nesterova O.V., Semal V.A., Sakara N.A., Brikmans A.V., Khokhlova A.I., Karpenko T.Y. Effect of Biochar on Soil CO2 Fluxes from Agricultural Field Experiments in Russian Far East // Agronomy. 2021. Vol. 11. 1559. https://doi.org/10.3390/agronomy11081559

16. Bridgwater A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass // Chem. Eng. Journal. 2003. Vol. 91. pp. 87-102. https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0

17. Chen M., Alim N., Zhang Y., Xu N., Cao X. Contrasting effects of biochar nanoparticles on the retention and transport of phosphorus in acidic and alkaline soils // Environmental pollution. 2018. Vol. 239. pp. 562-570. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.050

18. 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. 18 p. https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z

19. Enders, A. and Lehmann, J. (2012) Comparison of wet digestion and dry ashing methods for total elemental analysis of biochar. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 43:1042–1052.

20. International Biochar Initiative (IBI) Biochar Standards. Version 3.1 / International Biochar Initiative. – Washington, DC, 2015. – URL: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V1.1.pdf.

21. Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil // Geoderma. 2010. № 158. pp. 443-449. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013

22. Lehmann J., Kuzyakov Y., Pan G., Ok Y.S. Biochar and the plant-soil interface // Plant Soil. 2015. Vol. 395. pp. 1-5. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2658-3

23. Nesterova O., Brikmans A., Bovsun M., Semal V. Characteristics of the basic properties of biochar obtained from different types of vegetable raw materials // Edelweiss Applied Science and Technology. 2024. Vol. 8. pp. 8254-8259. https://doi.org/10.55214/25768484.v8i6.3780

24. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R., and Lehmann, J. (2011) 20 Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to 21 a temperate soil. Biology and Fertility of Soils 48, 271–284.

25. Sahoo S.S., Vijay V.K., Chandra R., Kumar H., Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo // Cleaner Engineering and Technology. 2021. Vol. 3. 100101. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101.

26. Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., & Bishop, P. (2012). Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. Plant and soil, 357(1-2), 173—187.

27. Yuan X., Ban G., Luo Y., Wang J., Peng D., Liang R., He T., Wang Z. Biochar effects on aggregation and carbon-nitrogen retention in different-sized aggregates of clay and loam soils: A meta-analysis // Soil and Tillage Research. 2025. Vol. 247. 106365. https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106365

28. Zhang Ya., Wang J., Feng Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: a review // Catena. 2021. Vol. 202. 105284. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105284

COMPARATIVE ANALYSIS OF BIOCHAR FROM VEGETABLE RAW MATERIALS AND PAPER WASTE

Brikmans A.V.[1], Nesterova O.V.[1], Bovsun M.A.[1]

[1]*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

brikmans.av@dvfu.ru*, nesterova.ov@dvfu.ru, bovsun.mal@dvfu.ru

ORCID: 0000-0003-0071-3951, 0000-0002-3463-0962, 0000-0003-1916-3566

Annotation

An initial assessment of the basic properties of biochar produced from plant and paper waste is essential to evaluate its potential use and the impact of its incorporation into soil. The study examined the properties of biochar generated through pyrolysis using used paper, a combination of herbs, and *Saccharina japonica*, in accordance with the standards of the IBI international quality. Pyrolysis of used paper lasted for 1 hour at 800 degrees Celsius, while pyrolysis of the mixture of herbs and *Saccharina japonica* lasted 1 hour at 500 degrees. Biochar produced from used paper had the lowest yield (31.5%) and batteries (NPK), and the highest pH (12.47), compared to biochar derived from the combination of herbs and Saccharina. The highest values for batteries (NPK) and Sorg (52.42%) were obtained for biochar made from the herb mixture. The concentration of heavy metals in all three types of biochars did not exceed acceptable levels. If the obtained biochars are used as soil improvers, caution should be taken when applying them to slightly alkaline and alkaline soils. All three types of biochars have an alkaline reaction and can lead to an increase in the alkalinity of the soil. The addition of biochar to acidic soils can help to reduce their acidity, while the introduction of biochar from a mixture of herbs and *Saccharina japonica* can also enrich the soil with essential plant nutrients.

Keywords

Biochar, plant residues, basic parameters, biochar yield.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2026 г.
Поступила после доработки 24 июня 2026 г.
Принята к печати 28 июня 2026 г.
Received 10, June, 2026
Revised 24, June, 2026
Accepted 28, June, 2026