

DOI: 10.58168/TBiEc2025\_57-61

УДК 336.717.2

# ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К УВЕЛИЧЕНИЮ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДНОГО ЗАПАСА: СТРАТЕГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК

## INNOVATIVE APPROACHES TO INCREASING SOIL CARBON STOCK: STRATEGIES FOR ORGANIC ADDITIVES

**Гудкова Н.А.**, преподаватель среднего профессионального образования кафедры химии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия.

**Томина Е.В.**, д.х.н., доцент, зав. кафедрой химии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия.

**Gudkova N.A.**, teacher of secondary vocational education of chemistry and biotechnology department FGBOU VO «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

**Tomina E.V.**, doctor of Chemical Sciences, associate professor, chairwoman of chemistry and biotechnology department at FGBOU VO «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

**Аннотация:** в свете глобальных климатических изменений увеличение и стабилизация почвенного углеродного запаса становится приоритетной задачей современного землепользования и экологической политики. Рассмотрены различные подходы к увеличению секвестрации С в почве. Выявлен устойчивый тренд эффективности применения органических добавок, таких как компост, биоуголь и солома, для увеличения запасов почвенного углерода. Органические добавки стимулируют удержание С, улучшая структуру почвы и активность микроорганизмов. Статья направлена на развитие современных решений в области углеродного депонирования.

**Abstract:** in the light of global climate change, increasing and stabilising the soil carbon stock becomes a priority task of modern land use and environmental policy. Different approaches to increase C sequestration in soil are considered. A steady trend in the effectiveness of organic additives such as compost, biochar and straw for increasing soil C stocks is identified. Organic additives stimulate C retention by improving soil structure and microbial activity. The article aims to develop modern solutions in the field of carbon sequestration.

**Ключевые слова:** депонирование углерода, запас углерода в почве, биоуголь, преобразование углерода, изменение климата, почвенные микроорганизмы.

**Keywords:** carbon sequestration, soil carbon stock, biochar, carbon conversion, climate change, soil microorganism.

Вопрос секвестрации почвенного углерода (SOC) становится все более актуальным в контексте борьбы с глобальным изменением климата и обеспечения продовольственной безопасности [1]. Повышение содержания SOC является многообещающей стратегией, направленной на смягчение последствий изменения климата, улучшение плодородия почвы и повышение устойчивости сельскохозяйственных систем. В настоящее время существует множество подходов к повышению запасов почвенного углерода, включая внесение органических добавок [1,2,3,4]. Представляются актуальными сравнение и анализ различных стратегий и их эффективности. Основное внимание будет уделено применению органических добавок, таких как компост, биоуголь и солома, и оценке их влияния на секвестрацию углерода.

В условиях современных методов ведения сельского хозяйства и растущей обеспокоенности по поводу изменения климата эффективное использование отходов сельскохозяйственного производства становится все более важным. Солома, как один из основных видов сельскохозяйственных отходов, может оказывать существенное влияние на баланс углерода в почве.

Способность анаэробной микробной предварительной обработки увеличивать скорость разложения различных видов соломы подчеркивает ее значительный потенциал в деградации лигноцеллюлозы [1]. Авторами было установлено, что продолжительность анаэробной микробной предварительной обработки оказывает определяющее действие на скорость разложения соломы через 60 дней в полевых условиях. Максимальная скорость разложения соломы наблюдалась через 6 часов предварительной обработки и достигла 59,03 %, что на 79,37 % больше по сравнению с необработанным контролем.

Отмечается, что предварительная обработка соломы рубцовыми микроорганизмами (РМ) приводила к увеличению общего содержания углерода в почве на 26,06-61,79% в течение 60-дневного эксперимента [1].

Таким образом, предварительная обработка с использованием РМ значительно увеличивает скорость разложения соломы, повышая доступность углерода для микробной переработки и секвестрации, что подтверждает эффективность данной стратегии.

Однако, важно учитывать, что использование анаэробных микроорганизмов может привести к увеличению выбросов  $\text{CH}_4$ , который является парниковым газом. Этот аспект требует тщательной оценки и оптимизации процессов для минимизации негативных последствий.

Одной из областей, представляющих большой интерес для секвестрации углерода в почве, является использование биоугля [2]. Потенциал биоугля для секвестрации углерода связан с:

- массовым выходом биоугля и содержанием в нем углерода;
- стабильностью углерода в биоугле;
- стабильностью биоугля в почве в различных условиях и временных рамках.

Выход фиксированного углерода соответствует эффективности преобразования углерода в биомассе в углерод в биоугле, что может быть использовано в качестве показателя потенциала секвестрации углерода биоуглем.

Вторым ключевым фактором, влияющим на потенциал секвестрации углерода в биоугле, является процентное содержание стабильного углерода. Содержание стабильного углерода в биоугле может существенно зависеть от условий производства и свойств сырья. С точки зрения производства, температура пиролиза является доминирующим параметром, влияющим на стабильность биоугля. С увеличением тяжести производства, включая самую высокую температуру обработки, время пребывания и снижение скорости нагрева, содержание стабильного ароматического углерода в биоугле становится более стабильным в почве и обладает потенциалом поглощения углерода [2].

Кроме того, свойства сырья биомассы, такие как биохимический состав и содержание неорганических элементов, также играют важную роль, влияя на стабильность биоугля. Как правило, биоуголь, произведенный из сырья с высоким содержанием лигнина, часто имеет высокое содержание ароматического углерода и более медленную скорость минерализации, что обеспечивает высокую стабильность в почве и долгосрочный потенциал связывания углерода [2].

В [3] сообщается, что биоуголь, полученный в результате газификации древесины (WGB), является многообещающим инструментом для увеличения секвестрации углерода без ущерба для выбросов парниковых газов или урожайности пшеницы. Биоуголь, полученный при газификации древесины, увеличил содержание углерода в почве в 2,2 раза на глубине 0 – 10 см и в 1,4 раза на глубине 10 – 40 см, и это изменение оставалось стабильным через два года после внесения. Не было отмечено влияния на общее содержание азота в почве, аммонийного азота и pH. Тем не менее, после внесения биоугля было отмечено значительное снижение уровня нитратного азота в почве, что требует дальнейшего изучения его потенциала качестве стратегии снижения вымывания нитратов. Хотя внесение биоугля привело к небольшому повышению температуры почвы (+0,1°C), не было отмечено никакого влияния на содержание воды в почве, потоки парниковых газов  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  в почве или урожайность.

Еще одним перспективным подходом к улучшению секвестрации углерода станет совместное внесение компоста и биоуголя. Совместное применение этих добавок привлекло внимание благодаря их потенциальному синергетическому эффекту.

В [4] установлено влияние совместного применения компоста и биоугля на метаболизм микроорганизмов и секвестрацию углерода в почвах городских зеленых насаждений (UGS). Авторы изучили экоферментную стехиометрию, чтобы понять, как эти добавки влияют на лимитирование питательных веществ и эффективность использования углерода микроорганизмами.

Результаты [4] показали, что совместное применение компоста и биоугля привело к усилению микробного лимитирования углерода в почве, что выражалось в увеличении

стехиометрического дисбаланса растворенных ресурсов и микробных сообществ, что, в свою очередь, привело к снижению эффективности использования углерода микроорганизмами.

Совместное применение компоста и биоугля привело к увеличению секвестрации органического углерода в почве городских зеленых насаждений, главным образом за счет увеличения поступления углерода из растений. Группа ВСС4 (7,5% компоста+4% биоугля, v/v) продемонстрировала самое высокое чистое связывание SOC, что объясняется оптимизированным динамическим балансом между поступлением углерода и микробным метаболизмом [4]. Эти результаты подчеркивают синергетический эффект комбинированного применения компоста и оптимальной дозировки биоугля для повышения способности к секвестрации углерода в почвах UGS.

Однако необходимы дальнейшие исследования для выяснения потенциала компоста и биоугля в увеличении поступления углерода из растений в почвы городских зеленых насаждений. Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на:

- изучении долгосрочных эффектов совместного применения компоста и биоугля;
- оценке влияния на другие характеристики почвы, такие как структура, водоудерживающая способность и доступность питательных веществ;
- исследовании оптимальных пропорций компоста и биоугля для различных типов почв и растительности.

Таким образом, анализ тематических исследований подчеркивает важную роль, которую играют органические добавки в усилении секвестрации почвенного углерода (SOC). Несмотря на различия в подходах, охваченных этими исследованиями, общая тенденция указывает на значительный потенциал этих стратегий в смягчении последствий изменения климата и улучшении состояния почвы.

Анализ этих исследований выявляет возможные опции, но и трудности для разработки стратегий секвестрации SOC. Внесение органических веществ может потребовать оптимизации для минимизации выбросов парниковых газов.

В заключение, можно выделить важные направления для дальнейших исследований в данной области:

- Необходимы долгосрочные исследования, оценивающие устойчивость секвестрации SOC при различных подходах, а также потенциальное влияние на другие экосистемные функции.
- Дальнейшие исследования механизмов, лежащих в основе секвестрации углерода в почве, включая роль микробных сообществ и стабилизацию органического вещества в почве.
- Следует изучить стратегии оптимизации управления для повышения эффективности секвестрации SOC и минимизации любых связанных с этим негативных последствий. Сюда входит определение оптимальных дозировок и комбинаций органических добавок.

### Список литературы

1. Effects of straw returning after anaerobic microbial pretreatment on soil carbon sequestration and emission reduction / L. Wei [et al.] // *Environmental Technology & Innovation*. – 2025. – Vol. 38. – 15p.
2. A critical review on production, modification and utilization of biochar / Y. Xie [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2022. – Vol. 161. – P. 10 – 11.
3. Wood gasification biochar enhances soil carbon sequestration without affecting greenhouse gas fluxes or wheat yield in sub-alkaline soil / L. Trozzo [et al.] // *Soil & Tillage Research*. – 2025. – V. 251. – 12p.
4. Co-application of compost and biochar promotes soil carbon sequestration: Evidence from eco-enzymatic stoichiometry / Q. Wang [et al.] // *Environmental Technology & Innovation*. – 2025. – V. 38. – 14p.

### References

1. Effects of straw returning after anaerobic microbial pretreatment on soil carbon sequestration and emission reduction / L. Wei [et al.] // *Environmental Technology & Innovation*. – 2025. – Vol. 38. – 15p.
2. A critical review on production, modification and utilization of biochar / Y. Xie [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2022. – Vol. 161. – P. 10 – 11.
3. Wood gasification biochar enhances soil carbon sequestration without affecting greenhouse gas fluxes or wheat yield in sub-alkaline soil / L. Trozzo [et al.] // *Soil & Tillage Research*. – 2025. – V. 251. – 12p.
4. Co-application of compost and biochar promotes soil carbon sequestration: Evidence from eco-enzymatic stoichiometry / Q. Wang [et al.] // *Environmental Technology & Innovation*. – 2025. – V. 38. – 14p.