

Рус. УДК 631.4

DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-2

## **Влияние химически модифицированного биочара на морфометрические показатели яровой пшеницы**

Клиндухова Ю. Ю.<sup>1</sup>, Бирюкова О. А.<sup>1</sup>, Калашников Н. Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия;*  
[y89889442692@gmail.com](mailto:y89889442692@gmail.com)

### *Аннотация*

В статье приведены результаты исследований по изучению влияния химически модифицированного биочара на морфометрические показатели яровой пшеницы в условиях вегетационного опыта. Установлено, что насыщенный суперфосфатом биочар (Б+Рс) проявил синергетический эффект. Его внесение в дозах 60 и 90 кг/га обеспечило увеличение длины побегов на 24,0 и 30,0 % соответственно. В варианте Б+Рс/60 отмечена максимальная длина корней (16,8 см) и их масса (2,25 г), что свидетельствует об усилении доступности фосфора и улучшении условий роста корней. Применение высокой дозы (150 кг д.в./га) нецелесообразно. Внесение немодифицированного биочара показало меньший эффект. Использование биочара, насыщенного суперфосфатом, позволит снизить дозу минеральных удобрений без потери эффективности. Полученные результаты следует оценить в условиях полевого опыта.

*Ключевые слова:* биочар, удобрение, яровая пшеница, чернозем обыкновенный карбонатный.

**Eng.**

## **The effect of a chemically modified biochar on the morphometric parameters of spring wheat**

Klindukhova J. Y.<sup>1</sup>, Biryukova O. A.<sup>1</sup>, Kalashnikov N. D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; [y89889442692@gmail.com](mailto:y89889442692@gmail.com)*

### *Annotation*

This paper presents the research results on the effect of chemically modified biochar on the morphometric parameters of spring wheat in a vegetation experiment. It was found that biochar saturated with superphosphate (B+Pc) exhibited a synergistic effect. Its application at rates of 60 and 90 kg/ha resulted in an increase in shoot length by 24.0% and 30.0%, respectively. The B+Pc/60 treatment showed the maximum root length (16.8 cm) and root mass (2.25 g), indicating enhanced phosphorus availability and improved root growth conditions. The application of a high dose (150 kg/ha) was found to be impractical. The use of unmodified biochar showed a lesser effect. The use of superphosphate-saturated biochar will allow for a reduction in mineral fertilizer rates without a loss of efficiency. The obtained results should be evaluated in a field experiment.

*Keywords:* biochar, fertilizer, spring wheat, calcic chernozems.

### **Введение**

В настоящее время возрастает интерес к биочару как перспективному органическому удобрению, поскольку его применение позволяет одновременно решать две важнейшие проблемы современности: долговременное улучшение плодородия почв и необходимость секвестрации углерода атмосферы (Lehmann, J. 2007). Биочар – это уголь, полученный в результате пиролиза различных материалов (растительности, костей животных и пр.) (Lehmann et al., 2015; Bashir et al., 2018; He et al., 2021). Биочар характеризуется высоким содержанием углерода, большая часть которого находится в виде ароматических структур. Они очень стабильны и являются причиной того, что биочар не разлагается полностью в течение столетий или даже тысячелетий (Lehmann, Joseph, 2015; Glaser et al., 2000). Учитывая резкое сокращение запасов углерода в органическом веществе почвы из-за землепользования и изменения климата, устойчивость биочара делает его привлекательным с целью связывания углерода в качестве стратегии смягчения последствий изменения климата (Guo, Gifford, 2002; Lehmann, 2007; Schmidt et al., 2011; Lehmann et al., 2011; Bamdad et al., 2021).

Большинство исследований, посвященных применению биочара, сосредоточены на изучении доступности и удержании поллютантов при техногенном загрязнении почв (Минкина и др. 2016.). При этом меньше внимания уделяется анализу влияния биочара на питательный режим почвы и рост сельскохозяйственных культур (Gregory, 2014; Wang, 2020.). Трудности изучения биочара и его воздействия на почву связаны с тем, что биочар может обладать очень разными свойствами в зависимости от используемого сырья и режима термической обработки (Gashikovich et al., 2015).

Влияние биочара на систему «почва-растение» широко варьирует в зависимости от его вида и дозы, типа почв, а также климатических условий. Значительное увеличение плодородия почвы, роста растений и их урожайности в основном наблюдались при применении биочара в тропических и субтропических регионах (Mulcahy et al., 2013; Liu et al., 2014; Raboin et al., 2016). Добавление биочара в почву улучшает ее структуру, способствует удерживанию влаги, стимулирует микробиологическую активность, ускоряет рост культурных растений и увеличивает их урожайность (Atkinson, 2010; Jeffery, 2011; Major, 2010; Purakayastha, 2019).

Сведений о влиянии биочара на развитие сельскохозяйственных культур на черноземных почвах крайне недостаточно.

Цель исследования - изучение влияния химически модифицированного биочара на морфометрические показатели яровой пшеницы на черноземе обыкновенном.

### **Объекты и методы**

Исследования проводили в условиях вегетационного опыта. Почва для опыта отобрана на территории ООПТ «Персиановская заповедная степь» в слое 0–20 см. По современной классификации почв России – чернозем миграционно-сегрегационный (Шишов, 2004). Содержание гумуса в перегнойно-аккумулятивном горизонте составляет 5,08 %, что соответствует средней обеспеченности (Орлов и др., 2005). Степень обеспеченности почвы подвижным фосфором – средняя (19,0 мг/кг), подвижным калием – высокая (440,0 мг/кг) (Методические указания..., 2003).

В качестве опытной культуры использовали яровую твердую пшеницу (*Triticum durum* Desf.) сорта Мелодия Дона. Данный сорт характеризуется высокой адаптивностью к засушливым условиям и устойчивостью к основным болезням, распространенным в регионе Северного Дона

(головневые, мучнистая роса, вирусные инфекции). Мелодия Дона рекомендована для возделывания на почвах с высоким и средним уровнем плодородия, с потенциальной урожайностью до 6,0 т/га. Сорт включен в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в Северо-Кавказском, Средневолжском и Уральском регионах (<http://reestr.gossort.gov.ru>).

Биочар был получен из соломы яровой пшеницы. Солому промывали дистиллированной водой, высушивали в сушильном шкафу при температуре 80°C 6 часов. Затем измельчили на зерновой мельнице до диаметра частиц 0,5 мм. Пиролиз растительной массы осуществлялся по стадиям: сначала нагревали до 300°C и поддерживали такую температуру в течение 15 мин, затем температуру поднимали до 500°C и поддерживали 60 мин. Полученный биочар промывали КОН и насыщали обогащенным суперфосфатом с содержанием фосфора – 29,0 %.

Промывка КОН необходима для целенаправленного создания микропор и освобождения пор от органических остатков, что приводит к максимизации площади поверхности и сорбционной способности угля, полученного из сельскохозяйственных отходов (Лобзенко и др., 2022). В представленном исследовании этот подход применяется для модификации биочара, полученного из соломы яровой пшеницы.

Суперфосфат простой –  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaSO}_4$  получается разложением фосфатного сырья серной кислотой. В настоящее время выпускается в основном в гранулированной форме, так как он не слеживается, хорошо рассеивается, более равномерно распределяется по поверхности почвы и меньше контактирует с почвой, что важно с точки зрения снижения ретроградации фосфора. В соответствии с действующим ГОСТом 5956–78 суперфосфат гранулированный из апатитового концентрата должен содержать не менее 19%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , не более 3,5% воды, не менее 85% гранул должны иметь размер 1–4 мм, содержание свободной кислоты в пересчете на  $\text{H}_3\text{PO}_4$  должно быть не более 3,2%. Качество суперфосфата оценивается, главным образом, по содержанию в нем водорастворимых соединений (дигидрофосфата кальция и фосфорной кислоты), содержание которых должно составлять 75–90% от усвояемых форм фосфора, остальные 10–25%  $\text{P}_2\text{O}_5$  представлены, главным образом, гидрофосфатом кальция ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Минеев, 2017).

Схема вегетационного опыта включала следующие варианты: 1) Контроль (б/у), 2) Рс/60, 3) Рс/90, 4) Рс/150, 5) Б/60, 6) Б/90, 7) Б/150, 8) Б+Рс/60, 9) Б+Рс/90, 10) Б+Рс/150. Контрольный вариант без удобрений (б/у). В удобренных вариантах цифры указывают дозу биочара (Б), суперфосфата (Рс) и биочара, насыщенного суперфосфатом (Б+Рс), по действующему веществу ( $P_2O_5$ ) – 60, 90 и 150 кг/га. Повторность опыта 3-кратная.

В подготовленную почву (500 г) вносили рассчитанное количество указанных удобрений. Инкубировали почву с удобрениями (Б, Рс, Б+Рс) 7 дней и проводили посев яровой пшеницы. После прорастания в сосудах оставляли по 15 растений. По мере необходимости осуществляли полив одинаковым объемом воды, поддерживая влажность почвы на уровне 60 % наименьшей полевой влагоемкости (НВ). Влагоемкость почвы была определена в лабораторных условиях по классическому методу Н.А. Качинского (Терпелец, Слюсарев, 2016). При проведении модельного эксперимента регулярно взвешивали вегетационные сосуды с почвой и добавляли воду, когда ее вес становился меньше полученного значения для 60% НВ, компенсируя недостаток влаги.

На 25-е сутки были изучены морфометрические параметры яровой пшеницы: длина побегов и корней, масса побегов и корней.

Содержание гумуса в почве определяли по методу Тюрина – ЦИНАО, ГОСТ 26213-91; подвижные формы фосфора и калия – по методу Мачигина в модификации ЦИНАО, ГОСТ 26205-91.

Дисперсионный анализ полученных результатов проводили в пакете программ STATISTICA 13.3 с 5 % уровнем значимости ( $P < 0.05$ ).

### **Результаты и обсуждение**

Согласно полученным данным, средняя длина побегов яровой пшеницы контрольного варианта составила 23,4 см. Внесение в почву суперфосфата в дозе 90 кг д.в./га увеличило длину надземной части растений на 33,0 %. Применение суперфосфата в дозах 60 и 150 кг д.в./га достоверно не повлияло на изучаемый морфометрический показатель яровой пшеницы (рис. 1).

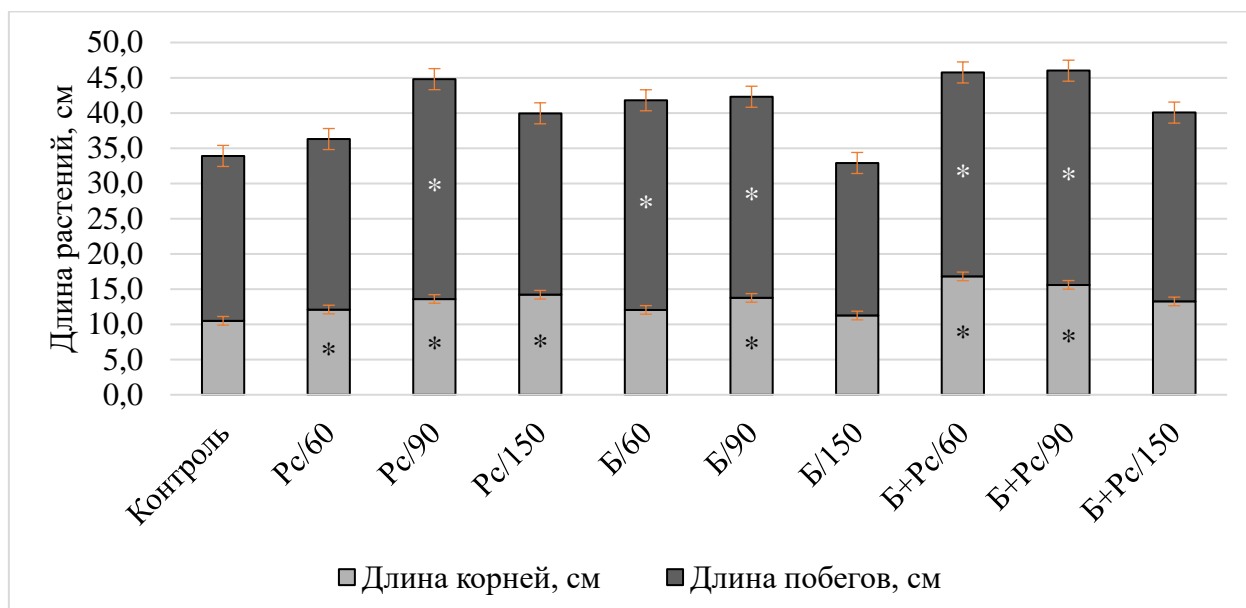


Рис. 1 – Высота растений яровой пшеницы при внесении в почву химически модифицированного биочара (\* - достоверно значимое отличие от контроля при  $p < 0,05$ )

Внесение биочара оказало положительное действие на рост и развитие растений яровой пшеницы. При использовании биочара в дозах 60 и 90 кг/га длина побегов увеличилась на 27,0 и 22,0 % соответственно. При повышении дозы биочара до 150 кг д.в./га этот показатель остался на уровне контрольного варианта. Полученные данные согласуются с результатами других исследований (Госсе и др., 2021; Nguyen, Pham, 2024).

Применение биочара, насыщенного раствором суперфосфата, существенно повышает высоту побега на 24,0% (Б+Рс/60) и 30,0% (Б+Рс/90). В варианте с Б+Рс/150 увеличение длины надземной массы растений оказалось статистически незначимым.

Аналогичная закономерность наблюдалась и при анализе развития корневой системы. Средняя длина корней яровой пшеницы на контрольном варианте составила 10,5 см. Применение суперфосфата в изучаемых дозах существенно повышает данный показатель. Наибольший эффект был достигнут при максимальной дозе (150 кг д.в./га). В этом варианте длина корней увеличилась на 35,0%. Меньшие дозы удобрения (Рс/60 и Рс/90) показали менее выраженный эффект – увеличение составило 15,0 и 30,0% соответственно.

Критический период фосфорного питания пшеницы приходится на начальные этапы роста, поскольку молодые растения обладают ограниченной

всасывающей поверхностью корней, что затрудняет поглощение фосфора. Оптимальное обеспечение этим элементом на ранних стадиях развития не только компенсирует эту физиологическую особенность, но и стимулирует рост корневой системы. В частности, применение суперфосфата способствует усиленному ветвлению корней и их более глубокому проникновению в почвенный профиль. Это, в свою очередь, улучшает доступ растений к питательным веществам и влаге, а также положительно влияет на физиологические процессы, включая накопление сахаров в растительных тканях (Агеев и др., 1999; Фурсова, 2015).

Достоверное увеличение длины корней яровой пшеницы при внесении биочара выявлено только в варианте со средней (Б/90) дозой действующего вещества – на 31,0 %. В вариантах Б/60 и Б/150 наблюдалась тенденция к повышению рассматриваемого показателя, что подтверждено результатами дисперсионного анализа. По данным Н. В. Громаковой (2017) биочар положительно влияет на увеличение длины корневой части растений. Следует отметить, что высокая доза биочара не оказало математически значимого эффекта, как и на длину побегов, и так же длина корней, что свидетельствует о ее нецелесообразности. Вероятной причиной отсутствия положительного эффекта от внесения немодифицированного биочара в дозе 150 д.в. кг/га является изменение физико-химических свойств почвенной среды в краткосрочном вегетационном опыте. Использование высокой дозы биочара, обладающего большой сорбционной емкостью и щелочной реакцией, могло привести к временному связыванию доступных форм питательных элементов и существенному сдвигу pH в прикорневой зоне. Это, в свою очередь, могло нарушить солевой и окислительно-восстановительный баланс, оказав стрессовое воздействие на молодые растения и нивелировав потенциальные положительные эффекты биочара (Минникова и др., 2023). В условиях полевого опыта, где процессы взаимодействия удобрений с почвой протекают более плавно и в большем объеме, подобный негативный эффект высокой дозы может быть менее выраженным.

Наилучшим образом на изучаемый показатель повлияло внесение в почву химически модифицированного биочара. Максимальное увеличение длины корней наблюдалось в варианте Б+Рс/60 – на 60,0 %. Положительный эффект уменьшался с увеличением дозы удобрения, но все еще был на высоком уровне – на 49,0 и 26,0 % для вариантов Б+Рс/90 и Б+Рс/150 соответственно.

В вегетационном опыте была изучена масса побегов и корней яровой пшеницы при внесении различных доз биочара, как не модифицированного, так и насыщенного суперфосфатом. На контрольном варианте масса надземной части растений составила 3,95 г. Внесение в почву суперфосфата достоверно увеличило данный показатель на 19,0, 23,0 и 16,0 % относительно контроля соответственно по вариантам опыта Рс/60, Рс/90 и Рс/150 (рис. 2).

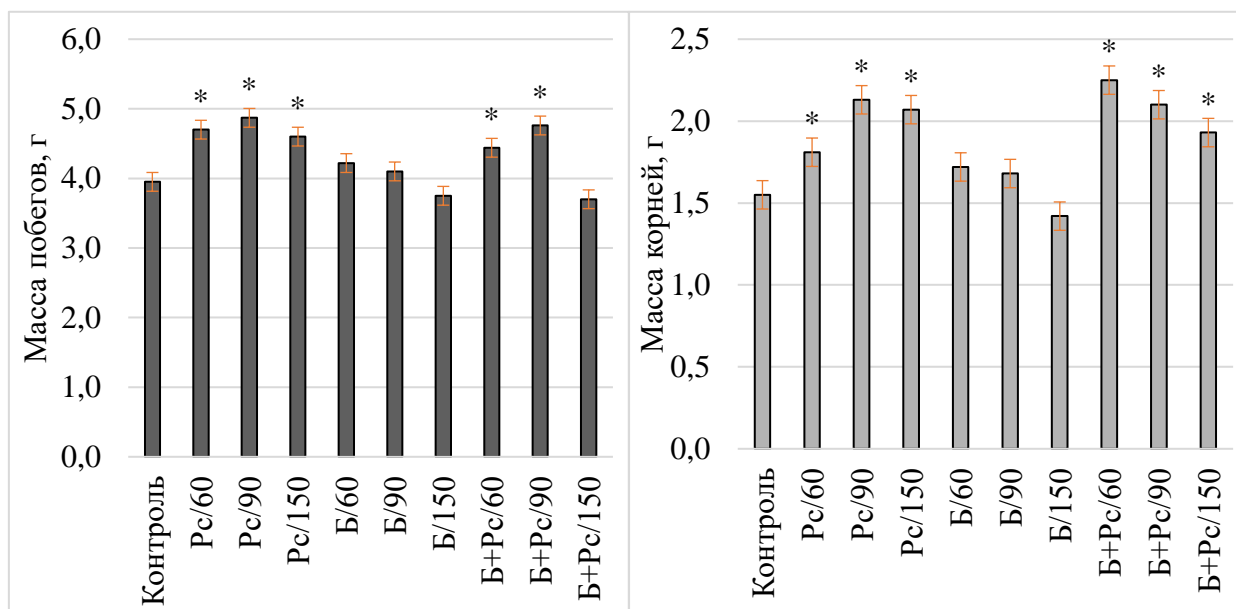


Рис. 2 – Масса растений яровой пшеницы при внесении в почву химически модифицированного биочара (\* - достоверно значимое отличие от контроля при  $p < 0,05$ )

В вариантах с применением биочара, не зависимо от применяемой дозы, существенных изменений не обнаружено, масса побегов осталась на уровне варианта без внесения удобрений. Это, вероятно, обусловлено свойствами биочара. Нельзя исключать изменение рН почвенного раствора в прикорневой зоне, что могло повлиять на доступность элементов питания. Некоторые исследования отмечают, что биочар может временно изменять окислительно-восстановительные условия в ризосфере (Шафигуллина, 2020).

Использование биочара насыщенного суперфосфатом положительно повлияло при внесении Б+Рс/60 и Б+Рс/90. Масса побегов в этих вариантах увеличилась на 12,0 и 21,0 % соответственно при сравнении с контролем. Повышенная доза химически модифицированного биочара (Б+Рс/150) не повлияла на изучаемый показатель – масса побегов была на уровне контроля.

Масса корней яровой пшеницы на контроле составила 1,55 г. В варианте Рс/60 она увеличилась на 17,0 %. Средняя и высокая доза суперфосфата

оказали большой эффект на массу корней растений, увеличение составило 37,0 и 34,0 % соответственно.

Внесение в почву биочара во всех изучаемых дозах не оказало достоверного влияния на массу корней.

Наибольший положительный эффект в целом по опыту получен при использовании Б+Рс в дозе 60 кг д.в./га. Увеличение массы корней яровой пшеницы в указанном варианте составило 45,0 % относительно контроля. Внесение химически модифицированного биочара в дозе 90 кг д.в./га увеличила массу корней на 35,0 %. Максимальная доза Б+Рс/150 также способствовала повышению рассматриваемого показателя, но в меньшей степени - на 25,0 %.

### **Заключение**

Проведённые исследования демонстрируют дозозависимый эффект применения биочара на морфометрические показатели яровой пшеницы. Биочар в чистом виде показал умеренную эффективность: максимальное увеличение высоты побегов (27,0 %) отмечено при дозе 60 кг д.в./га, а длины корней - при дозе 90 кг д.в./га (31,0 %). При этом немодифицированный биочар не оказал значимого влияния на биомассу, вероятно, из-за изменения рН почвы и окислительно-восстановительных условий в ризосфере. Насыщенный суперфосфатом биочар (Б+Рс) проявил синергетический эффект. Его внесение в дозах 60 и 90 кг д.в./га обеспечило увеличение длины побегов на 24,0 и 30,0 % соответственно. В варианте Б+Рс/60 отмечена максимальная длина корней (16,8 см) и их масса (2,25 г), что свидетельствует об усилении доступности фосфора и улучшении условий роста корней.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030»).

### **Список использованных источников**

Агеев В. В., Чернов А. П., Куйдан А. П., Демкин В. И., Махуков П. И., Подколзин А. И., Есаулко А. Н., Кузённая М. А., Литвиненко М. В. Особенности питания и удобрения сельскохозяйственных культур на Юге России: учебное пособие для студентов вузов агрономических

специальностей / под ред. проф. В. В. Агеева. – Ставрополь : СГСХА, 1999. – 113 с.

Госсе Д. Д., Девичи Ф., Пашкевич Е. Б., Кубарев Е. Н., Амелянчик О. А., Воронина Л. П. Питательная ценность биочара при выращивании яровой пшеницы (*TRITICUM AESTIVUM*) на аллювиальной среднесуглинистой почве // Проблемы агрохимии и экологии. 2021. № 3–4. С. 38–44. DOI 10.26178/AE.2021.81.61.002.

ГОСТ 26205–91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 10 с.

ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 8 с.

ГОСТ 5956–78. Суперфосфат гранулированный из апатитового концентрата без добавок и с добавками микроэлементов. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 31 с.

Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том 1. «Сорта растений» / Официальное издание. — М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. — 512 с. — [Электронный ресурс]. — URL: <http://reestr.gossort.gov.ru> (дата обращения: 12.05.2025).

Громакова Н. В. Исследование влияния биочара на рост и развитие салата-латука на черноземе обыкновенном // Овощи России. 2017. № 5. С. 72–73. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-72-73>.

Лобзенко И. П., Минкина Т. М., Бурачевская М. В., Бауэр Т. В., Манджиева С. С. Активация поверхности биочара, получаемого из растительного сырья, для ремедиации загрязненных почв // Актуальная биотехнология. – 2022. – № 1. – С. 190–192.

Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 240 с.

Минеев В. Г. Агрохимия : учебник / под редакцией В. Г. Минеева. — Москва : Издательство Всероссийского научно-исследовательского института агрохимии им. Д. Н. Прянишникова, 2017. — 854 с. — ISBN 978-5-9238-0236-8.

Минкина Т. М., Манджиева С. С., Богданова А. М., Чаплыгин В. А., Бауэр Т. В., Бурачевская М. В., Маштыкова Л. Ю., Громакова Н. В., Сушкова С. Н. Поступление цинка и свинца в ячмень из загрязненной почвы // Живые и биокосные системы. 2016. № 17. – 18 с.

Минникова Т.В., Минин Н.С., Колесников С.И., Горовцов А.В., Чистяков В.А. Оценка фитотоксичности чернозема обыкновенного при применении *Bacillus* sp. и биочара для стимуляции разложения пожнивных остатков озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Агрохимия. - 2023. - №5. - С. 60-69. doi: [10.31857/S0002188123050058](https://doi.org/10.31857/S0002188123050058).

Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Суханова Н. И. Химия почв. – М. : Высшая школа, 2005. – 558 с.

Терпелец В. И., Слюсарев В. Н. Агрофизические и агрохимические методы исследования почв. учебно-методическое пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 65 с.

Фурсова А. Ю., Есаулко А. Н. Влияние систем удобрения, способов и приёмов обработки чернозема выщелоченного на химический состав растений озимой пшеницы // Аграрный вестник Северного Кавказа. 2015. № 2 (18). С. 182–186.

Шафигуллина Л. Р. Различные аспекты применения биочара // Вестник магистратуры. 2020. №5–5 (104). С. 7–10.

Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск : Ойкумена, 2004. – 342 с.

Atkinson C. J., Fitzgerald J. D., Hipps N. A. // Plant and Soil. 2010. Vol. 337. P. 1–18.

Bamdad H., Papari S., Lazarovits G., Berruti F. Soil amendments for sustainable agriculture: Microbial organic fertilizers // Soil Use Manag. 2021. V. 38. P. 120–194. <https://doi.org/10.1111/sum.12762>.

Bashir S., Zhu J., Fu Q., Hu H. Cadmium mobility, uptake, and anti-oxidative response of water spinach (*Ipomoea aquatic*) under rice straw biochar, zeolite, and rock phosphate as amendments // Chemosphere. 2018. V. 194. P. 579–587. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.162>.

Gashikovich G. K., Vasilyevna S. E., Rubenovich G. B., Valeeva A. A. The possibility of using research methods of soil organic matter for assessing the

biochar properties // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015. No. 6(4). P. 194–201.

Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics // *Naturwissenschaften*. 2000. V. 88. № 1. P. 37–41.

Gregory S. J., Anderson C. W. N., Arbestain M. C., McManus M. T. Response of plant and soil microbes to biochar amendment of an arsenic-contaminated soil // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014. Vol. 191. P. 133-141.

Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis // *Glob. Change Biol*. 2002. V. 8 (4). P. 345–360.

He M., Xiong X., Wang L., Hou D., Bolan N.S., Ok Y.S., Rinklebe J., Tsang D.C.W. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils // *J. Hazard. Mater*. 2021. V. 414. Iss. 125378. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>.

Jeffery S., Verheijen F. G. A., van der Velde M., Bastos A. C. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2011. Vol. 144. P. 175–187.

Lehmann J. Biochar effects on soil biota — a review / J. Lehmann, M.C. Rillig, J. Thies // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. №43. P. 1812-1836.

Lehmann J. Bioenergy in the black // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007. Vol. 5, No. 7. P. 381–387.

Lehmann J., Kleber M., Pan G., Bhupinder P.S., Sohi S.P., Zimmerman A.R. Persistence of biochar in soil // *Biochar for environmental management: Science, technology, and Implementation*. 2nd ed. Earthscan Rutledge, 2015. P. 235–282.

Lehmann J., Kuzyakov Y., Pan G., Ok Y.S. Biochars and the plant-soil interface // *Plant Soil*. 2015. V. 395. P. 1–5. – doi: 10.1007/s11104-015-2658-3.

Liu Z., Chen X., Jing Y., Li Q. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil // *Catena*. 2014. Vol. 123. P. 45–51. doi: 10.1016/j.catena. 2014.07.005.

Major J., Rondon M., Molina D. et al. // *Plant and Soil*. 2010. Vol. 333. P. 117–128.

Mulcahy D. N., Mulcahy D. L., Dietz D. Biochar soil amendment increases tomato seeding resistance to drought in sandy soils // *J. Arid Environ*. 2013. Vol. 88. P. 222–225. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.07.012.

Nguyen T. K., Pham T. T. The effect of applying biochar in combination with mineral fertilizers on the growth, development, and yield of soybean varieties DT20 and DT26 // *Аграрная история*. 2024. №18. P. 11.

Purakayastha T. J., Kumari S., Biswas S. et al. // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 227. – P. 345–365.

Raboin L.-M., Razafimahafaly A. H. D., Rabenjari- soa M. B., Rabary B., Dusserre J., Becquer T. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long-term comparison in the highlands of Madagascar // *Field Crop. Res.* 2016. Vol. 199. P. 99–108. doi: 10.1016/j.fcr.2016.09.005.

Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., KögelKnabner I., Lehmann J., Manning D.A. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. V. 478 (7367). P. 49–56.

Wang Y., Liu Y., Zhan W., Zheng K., Wang J., Zhang C., Chen R. Stabilization of heavy metal-contaminated soils by biochar: Challenges and recommendations // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 729. P. 13–60.

## References

Ageev, V. V., Chernov, A. P., Kuydan, A. P., Demkin, V. I., Makhukov, P. I., Podkolzin, A. I., Esaulko, A. N., Kuzennaya, M. A., & Litvinenko, M. V. (1999). *Nutrition Features and Fertilization of Agricultural Crops in the South of Russia: A textbook for university students of agronomic specialties* (Prof. V. V. Ageev, Ed.). Stavropol: Stavropol State Agrarian University. 113 p. (In Russ.)

Gosse, D. D., Devechi, F., Pashkevich, E. B., Kubarev, E. N., Amelyanchik, O. A., & Voronina, L. P. (2021). Nutritional value of biochar in growing spring wheat (*Triticum aestivum*) on alluvial medium loamy soil. *Problems of Agrochemistry and Ecology*, (3-4), 38–44. DOI: 10.26178/AE.2021.81.61.002 (In Russ.)

GOST 26205-91 (1992). *Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Machigin method in the modification of TsINAO*. Moscow: Publishing House of Standards. 10 p. (In Russ.)

GOST 26213-91 (1992). *Soils. Methods for the determination of organic matter*. Moscow: Publishing House of Standards. 8 p. (In Russ.)

GOST 5956-78 (1988). *Granulated superphosphate from apatite concentrates without additives and with additives of trace elements. Technical specifications*. Moscow: Publishing House of Standards. 31 p. (In Russ.)

State Register of Selection Achievements Approved for Use. Volume 1. "Plant Varieties" (2023). Official publication. Moscow: FGBNU "Rosinformagrotech". 512 p. [Electronic resource]. URL: <http://reestr.gossort.gov.ru> (accessed: 12.05.2025). (In Russ.)

Gromakova, N. V. (2017). Investigation of the effect of biochar on the growth and development of lettuce on common chernozem. *Vegetables of Russia*, (5), 72–73. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2017-5-72-73> (In Russ.)

Lobzenko I. P., Minkina T. M., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Mandzhieva S. S. Activation of the surface of a biochar obtained from plant raw materials for remediation of polluted soils // *Actual biotechnology*. – 2022. – No. 1. – pp. 190-192. (In Russ.)

Methodological guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility in agricultural lands (2003). Moscow: FGNU "Rosinformagrotech". 240 p. (In Russ.)

Mineev, V. G. (Ed.) (2017). *Agrochemistry: Textbook*. Moscow : Publishing House of the All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov. 854 p. ISBN 978-5-9238-0236-8 (In Russ.)

Minkina, T. M., Mandzhieva, S. S., Bogdanova, A. M., Chaplygin, V. A., Bauer, T. V., Burachevskaya, M. V., Mashtykova, L. Yu., Gromakova, N. V., & Sushkova, S. N. (2016). The intake of zinc and lead into barley from polluted soil. *Living and Biokosmic Systems*, (17). 18 p. (In Russ.)

Minnikova T.V., Minin N.S., Kolesnikov S.I., Gorovtsov A.V., Chistyakov V.A. Evaluation of Phytotoxicity of Common Chernozem in the Application of *Bacillus* sp. and Biochar for Stimulation of Decomposition of Winter Wheat Harvest Residues (*Triticum aestivum* L.) // *Agrohimiâ*. - 2023. - N. 5. - P. 60-69. doi: [10.31857/S0002188123050058](https://doi.org/10.31857/S0002188123050058). (In Russ.)

Orlov, D. S., Sadovnikova, L. K., & Sukhanova, N. I. (2005). *Soil Chemistry*. Moscow: Vysshaya Shkola. 558 p. (In Russ.)

Terpelets V. I., Slyusarev V. N. *Agrophysical and agrochemical methods of soil research. educational and methodical manual*. Krasnodar: KubGAU Publ., 2016. 65 p. (In Russ.)

Fursova, A. Yu., & Esaulko, A. N. (2015). Influence of fertilizer systems, methods, and techniques of leached chernozem processing on the chemical composition of

winter wheat plants. *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*, 2(18), 182–186. (In Russ.)

Shafigullina, L. R. (2020). Various aspects of biochar application. *Bulletin of Magistracy*, 5-5(104), 7-10. (In Russ.)

Shishov, L. L., Tonkonogov, V. D., Lebedeva, I. I., & Gerasimova, M. I. (2004). *Classification and Diagnostics of Soils in Russia*. Smolensk: Oykumena. 342 p. (In Russ.)

Atkinson C. J., Fitzgerald J. D., Hipps N. A. // *Plant and Soil*. 2010. Vol. 337. P. 1–18.

Bamdad H., Papari S., Lazarovits G., Berruti F. Soil amendments for sustainable agriculture: Microbial organic fertilizers // *Soil Use Manag.* 2021. V. 38. P. 120–194. <https://doi.org/10.1111/sum.12762>.

Bashir S., Zhu J., Fu Q., Hu H. Cadmium mobility, uptake, and anti-oxidative response of water spinach (*Ipomoea aquatic*) under rice straw biochar, zeolite, and rock phosphate as amendments // *Chemosphere*. 2018. V. 194. P. 579–587. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.162>.

Gashikovich G. K., Vasilyevna S. E., Rubenovich G. B., Valeeva A. A. The possibility of using research methods of soil organic matter for assessing the biochar properties // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015. No. 6(4). P. 194–201.

Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics // *Naturwissenschaften*. 2000. V. 88. № 1. P. 37–41.

Gregory S. J., Anderson C. W. N., Arbestain M. C., McManus M. T. Response of plant and soil microbes to biochar amendment of an arsenic-contaminated soil // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014. Vol. 191. P. 133-141.

Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis // *Glob. Change Biol.* 2002. V. 8 (4). P. 345–360.

He M., Xiong X., Wang L., Hou D., Bolan N.S., Ok Y.S., Rinklebe J., Tsang D.C.W. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 414. Iss. 125378. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>.

Jeffery S., Verheijen F. G. A., van der Velde M., Bastos A. C. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2011. Vol. 144. P. 175–187.

Lehmann J. Biochar effects on soil biota — a review / J. Lehmann, M.C. Rillig, J. Thies // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. №43. P. 1812-1836.

Lehmann J. Bioenergy in the black // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007. Vol. 5, No. 7. P. 381–387.

Lehmann J., Kleber M., Pan G., Bhupinder P.S., Sohi S.P., Zimmerman A.R. Persistence of biochar in soil // *Biochar for environmental management: Science, technology, and Implementation*. 2nd ed. Earthscan Rutledge, 2015. P. 235–282.

Lehmann J., Kuzyakov Y., Pan G., Ok Y.S. Biochars and the plant-soil interface // *Plant Soil*. 2015. V. 395. P. 1–5. – doi: 10.1007/s11104-015-2658-3.

Liu Z., Chen X., Jing Y., Li Q. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil // *Catena*. 2014. Vol. 123. P. 45–51. doi: 10.1016/j.catena. 2014.07.005.

Major J., Rondon M., Molina D. et al. // *Plant and Soil*. 2010. Vol. 333. P. 117–128.

Mulcahy D. N., Mulcahy D. L., Dietz D. Biochar soil amendment increases tomato seeding resistance to drought in sandy soils // *J. Arid Environ*. 2013. Vol. 88. P. 222–225. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.07.012.

Nguyen T. K., Pham T. T. The effect of applying biochar in combination with mineral fertilizers on the growth, development, and yield of soybean varieties DT20 and DT26 // *Аграрная история*. 2024. №18. P. 11.

Purakayastha T. J., Kumari S., Biswas S. et al. // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 227. – P. 345–365.

Raboin L.-M., Razafimahafaly A. H. D., Rabenjari- soa M. B., Rabary B., Dusserre J., Becquer T. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long-term comparison in the highlands of Madagascar // *Field Crop. Res*. 2016. Vol. 199. P. 99–108. doi: 10.1016/j.fcr.2016.09.005.

Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., KögelKnabner I., Lehmann J., Manning D.A. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. V. 478 (7367). P. 49–56.

Wang Y., Liu Y., Zhan W., Zheng K., Wang J., Zhang C., Chen R. Stabilization of heavy metal-contaminated soils by biochar: Challenges and recommendations // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 729. P. 13–60.

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2025 г.

Поступила после доработки 11 сентября 2025 г.

Принята к печати 15 сентября 2025 г.

Received September 3, 2025

Revised September 11, 2025

Accepted September 15, 2025