 © Авторы статьи / Authors of the article

АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ/AGROCHEMISTRY, AGROSOIL SCIENCE, PLANT PROTECTION AND QUARANTINE

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.9 EDN: DKMZVL

ВЛИЯНИЕ БИОЧАРА И АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И АКТИВНОСТЬ УРЕАЗЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Научная статья

Мамунов С.Ф.[1], Чаленко Е.Е.[2], Моисеенко К.В.[3], Глазунова О.А.[4,*]

[1] ORCID : 0009-0001-2113-5938;
[2] ORCID : 0009-0008-0128-2528;
[3] ORCID : 0000-0002-3335-3641;
[4] ORCID : 0000-0002-9001-4072;

[1, 2, 3, 4] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (olga.a.glas[at]gmail.com)

Предложена: 26.06.2026; Принята: 05.08.2026; Опубликована: 19.08.2026

Аннотация

В работе оценено влияние различных доз биочара и аммиачной селитры на агрохимические показатели дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы и активность уреазы в условиях вегетационного опыта с яровой пшеницей сорта Злата. В работе использовался березовый биочар фракции 1–5 мм, полученный при пиролизе древесного сырья; источником минерального азота служила аммиачная селитра. Выявлено, что сочетание биочара и аммиачной селитры изменяло кислотно-основные условия, обеспеченность почвы доступными элементами питания и интенсивность ферментативных процессов, связанных с азотным обменом. Биохимическим показателем отклика почвы выступала активность уреазы, поскольку ее изменение отражало реакцию ферментного комплекса почвы на совместное внесение углеродсодержащего мелиоранта и минерального азота. Полученные данные позволяют рассматривать биочар как фактор регулирования агрохимического состояния дерново-подзолистой почвы, однако направленность эффекта зависит от уровня азотного питания и требует учета дозового сочетания компонентов.

Ключевые слова: биочар, аммиачная селитра, дерново-подзолистая почва, яровая пшеница, агрохимические показатели, уреаза, азотное питание.

THE INFLUENCE OF BIOCHAR AND AMMONIUM NITRATE ON THE AGROCHEMICAL PROPERTIES OF SOD-PODZOLIC SOIL AND UREASE ACTIVITY DURING THE CULTIVATION OF SPRING WHEAT

Research article

Mamunov S.F.[1], Chalenko E.E.[2], Moiseenko K.V.[3], Glazunova O.A.[4,*]

[1] ORCID : 0009-0001-2113-5938;
[2] ORCID : 0009-0008-0128-2528;
[3] ORCID : 0000-0002-3335-3641;
[4] ORCID : 0000-0002-9001-4072;

[1, 2, 3, 4] Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (olga.a.glas[at]gmail.com)

Suggested: 26.06.2026; Accepted: 05.08.2026; Published: 19.08.2026

Abstract

The work assessed the effect of various doses of biochar and ammonium nitrate on the agrochemical properties of a sod-podzolic medium-loam soil and on urease activity in a growing season experiment with spring wheat of the ‘Zlata’ variety. Birch biochar with a particle size of 1–5 mm, obtained by pyrolysis of woody raw materials, was used in the research; ammonium nitrate served as the source of mineral nitrogen. It was found that the combination of biochar and ammonium nitrate altered the acid-base conditions, the availability of nutrients in the soil, and the intensity of enzymatic processes associated with nitrogen metabolism. Urease activity served as a biochemical indicator of the soil’s response, as changes in this activity reflected the reaction of the soil’s enzyme complex to the combined application of a carbon-containing soil improver and mineral nitrogen. The data obtained suggest that biochar can be regarded as a factor regulating the agrochemical status of sod-podzolic soil; however, the direction of the effect depends on the level of nitrogen supply and requires consideration of the dosage combination of the components.

Keywords: biochar, ammonium nitrate, sod-podzolic soil, spring wheat, agrochemical parameters, urease, nitrogen fertilisation.

Введение

Биочар относится к устойчивым углеродсодержащим материалам, которые получают при термическом разложении органического сырья в условиях ограниченного доступа кислорода. Перспективность применения биочара в почвах

 © Авторы статьи / Authors of the article

связано с его высокой сорбционной емкостью, влагоудерживающей способностью, а также влиянием на кислотно-основные условия в почве и доступность элементов минерального питания [1], [2]. Эффективность применения биочара определяется как его собственными свойствами, так и характеристиками почвы, включая гранулометрический состав, содержание органического вещества и исходную реакцию среды [2], [3].

Дерново-подзолистые почвы широко распространены в зоне достаточного увлажнения и часто характеризуются кислой реакцией среды, ограниченной биологической активностью и высокой чувствительностью к системе удобрения. Внесение биочара в такие почвы может сопровождаться изменением pH, содержания подвижных форм фосфора и калия, а также трансформации минеральных соединений азота [3], [4], [5]. Однако эффект биочара не является универсальным: он зависит от исходных свойств почвы, сырья и температуры пиролиза, дозы материала и сочетания с минеральными удобрениями [1], [3], [6], [7], [8].

Азотное питание является одним из основных факторов продукционного процесса зерновых культур. Аммиачная селитра содержит аммонийную и нитратную формы азота, поэтому ее внесение влияет на соотношение доступных минеральных форм и на направление протекания микробиологических процессов [9]. Биочар может изменять миграцию и трансформацию азота за счет сорбции, изменения реакции среды и формирования порового пространства, благоприятного для микроорганизмов [1], [2], [5]. По этой причине совместное действие биочара и аммиачной селитры должно оцениваться не только по содержанию минеральных форм азота, но и по биохимическим показателям почвы [5], [10], [11].

Ферментативная активность отражает состояние биологического звена почвенного плодородия и может использоваться для оценки реакции почвы на внесение мелиорантов и удобрений [10], [11], [12]. Уреаза является одним из ключевых ферментов азотного цикла почвы и является одним из показателей интенсивности азотного обмена в почве [10], [13], [14]. Изменение активности уреазы при внесении биочара и азотного удобрения позволяет оценить, сопровождается ли агрохимический эффект изменением функциональной активности почвенного ферментного комплекса [11], [14].

Целью работы была оценка влияния различных доз биочара и аммиачной селитры на агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы и активность уреазы в условиях вегетационного опыта с яровой пшеницей сорта Злата.

Методы и принципы исследования

Вегетационный опыт проводили в условиях вегетационного домика РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Объектом служила окультуренная дерново-неглубокоподзолистая профильноглееватая глубокопахатная среднесуглинистая почва, привезенная с полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Исходно почва имела следующие агрохимические показатели: pH водной вытяжки 6,1, содержание подвижного фосфора по Кирсанову 289 мг/кг (VI класс по Кирсанову) и содержание подвижного калия по Кирсанову 319 мг/кг (VI класс по Кирсанову). В качестве тест-культуры использовали яровую пшеницу сорта Злата.

Растения выращивали в сосудах Митчерлиха вместимостью 5,2 кг почвы. Посев проводили по 30 семян на сосуд на глубину 3 см. Опыт включал четыре повторности. Отбор почвенных образцов был проведен после окончания вегетационного периода и сбора урожая.

Опыт был заложен по двухфакторной схеме: фактор BC отражал дозу биочара — 0, 10 и 30 г/сосуд, что соответствовало 0 т/га, 5,8 т/га и 17,3 т/га, фактор N — дозу аммиачной селитры — 0, 100 и 300 мг N/кг почвы. Схема включала девять вариантов: BC0–N0, BC0–N1, BC0–N2, BC1–N0, BC1–N1, BC1–N2, BC2–N0, BC2–N1, BC2–N2. Контролем служил вариант BC0–N0 без внесения биочара и аммиачной селитры; остальные варианты позволяли оценить раздельное и совместное действие изучаемых факторов.

В работе был использован коммерческий образец биочара марки «Березняк» (ООО «Вятская Угольная Компания», Россия). Биочар был получен из березовых опилок при температуре пиролиза 500–700 °C. Применяли фракцию 1–5 мм. Биочар характеризовался высоким содержанием углерода (92,5%) и щелочной реакцией среды (pH = 9), что позволяло рассматривать его как потенциальный фактор изменения кислотно-основного состояния почвы.

pH солевой вытяжки почвы определяли потенциометрическим методом по ГОСТ 26483-85. Содержание аммонийного азота определяли фотометрическим методом по ЦИНАО в соответствии с ГОСТ 26489-85. Содержание нитратного азота определяли методом УФ-спектрофотометрии по методике В.М. Лапушкина [14]. Содержание подвижных соединений фосфора и обменного калия определяли по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО в соответствии с ГОСТ Р 54650-2011. Активность уреазы определяли по методу E. Kandeler и H. Gerber [12] в модификации A. Piotrowska-Długosz и E. Wilczewski [13]. Метод основан на количественном определении аммонийного азота, образующегося при ферментативном гидролизе мочевины почвенной уреазой. Для анализа к 5 г почвы добавляли 20 мл боратного буфера (pH 10,0) и 2,5 мл 0,72 М раствора мочевины, инкубировали при 37 °C в течение 2 ч. После завершения инкубации в реакционную смесь вносили 30 мл 1 М раствора KCl, встряхивали в течение 30 мин и фильтровали. Содержание аммонийного азота в фильтрате определяли фотометрическим методом по ГОСТ 26489-85 (метод ЦИНАО). Активность уреазы рассчитывали по количеству образовавшегося аммонийного азота как разность между опытной и контрольной пробами с пересчётом на массу абсолютно сухой почвы и выражали в мг $N\text{-}NH_4^+$ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$.

Статистическая обработка данных была выполнена по общепринятым методикам.

Основные результаты

Изменение pH солевой вытяжки представлено на рисунке 1. Значения pH_{KCl} изменялись от 5,91 до 6,86. Минимальный показатель получен в варианте BC0-N2, где биочар не вносили, а аммиачную селитру применяли в высокой дозе. Максимальное значение отмечено в варианте BC2-N2 при совместном внесении высокой дозы биочара и высокой дозы аммиачной селитры.

 © Авторы статьи / Authors of the article

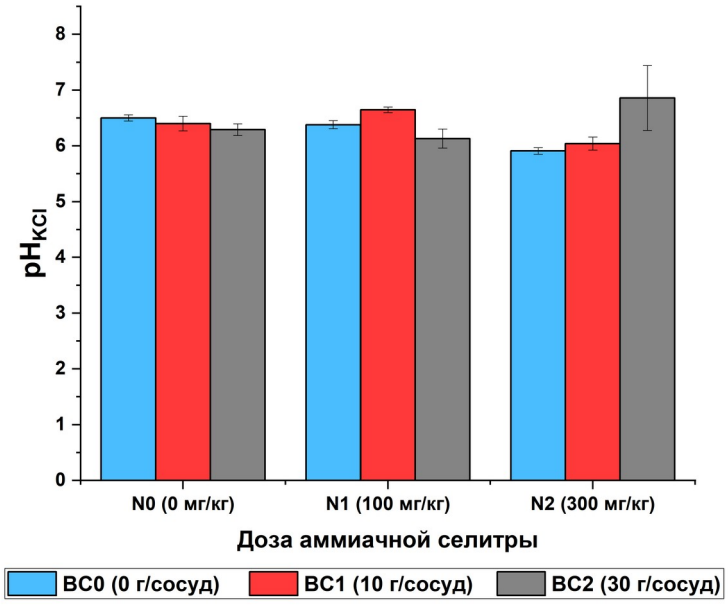

Рисунок 1 - Изменение pH солевой вытяжки по вариантам опыта
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.9.1

Примечание: $НСР_{05}$ = 0,32

При отсутствии азотного удобрения внесение биочара не сопровождалось достоверным повышением pH: значения составляли 6,50 в контроле, 6,40 в варианте BC1-N0 и 6,29 в варианте BC2-N0. На фоне N1 более высокое значение отмечено при умеренной дозе биочара (BC1-N1 — 6,65), однако различие с вариантом BC0-N1 (6,38) не превышало $НСР_{05}$. На фоне N2 высокая доза биочара изменила реакцию среды наиболее резко: pH повысился с 5,91 в BC0-N2 до 6,86 в BC2-N2.

По данным дисперсионного анализа отдельное действие биочара и отдельное действие аммиачной селитры на pH были недостоверными ($p > 0,05$). Достоверным оказалось взаимодействие факторов BC × N ($p < 0,01$). Это означает, что реакция почвенной среды зависела не от одного фактора, а от конкретного сочетания доз биочара и азотного удобрения.

Содержание подвижного фосфора по вариантам опыта представлено на рисунке 2. Значения P_2O_5 находились в диапазоне от 248 до 326 мг/кг. Максимальное содержание подвижного фосфора отмечено в варианте BC1-N0 — 326 мг/кг. Минимальное значение получено в варианте BC2-N1 — 248 мг/кг.

 © Авторы статьи / Authors of the article

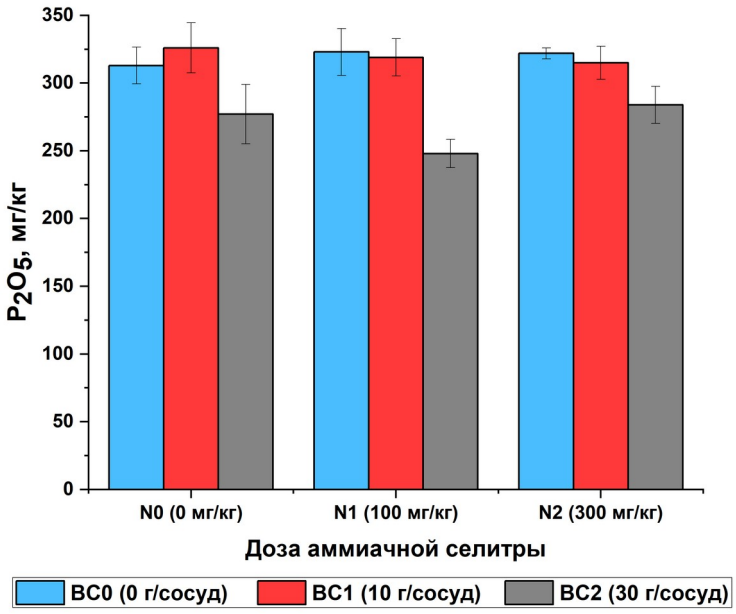

Рисунок 2 - Содержание подвижного фосфора в почве при различных дозах биочара и аммиачной селитры
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.9.2

Примечание: $НСР_{05}$ = 21 мг/кг

В вариантах без биочара содержание P_2O_5 оставалось высоким: 313 мг/кг в BC0-N0, 323 мг/кг в BC0-N1 и 322 мг/кг в BC0-N2. Умеренная доза биочара также не снижала обеспеченность почвы подвижным фосфором: при дозе BC1 значения составляли 326, 319 и 315 мг/кг соответственно для N0, N1 и N2. Внесение высокой дозы биочара, напротив, сопровождалась снижением показателя: 277 мг/кг в BC2-N0, 248 мг/кг в BC2-N1 и 284 мг/кг в BC2-N2.

Статистически значимым было действие дозы биочара ($p < 0,01$), а также взаимодействие BC × N ($p < 0,05$). Отдельное действие аммиачной селитры на содержание подвижного фосфора не подтверждено ($p > 0,05$). Высокая доза берёзового биочара не увеличивала содержание подвижного фосфора, а в ряде вариантов достоверно снижала его относительно вариантов BC0 и BC1.

Содержание обменного калия показано на рисунке 3. Значения K_2O изменялись от 217 до 398 мг/кг. Минимальное содержание отмечено в варианте BC0-N1, максимальное — в варианте BC2-N0. Разница между ними составила 181 мг/кг и превышала $НСР_{05}$ = 58 мг/кг.

 © Авторы статьи / Authors of the article

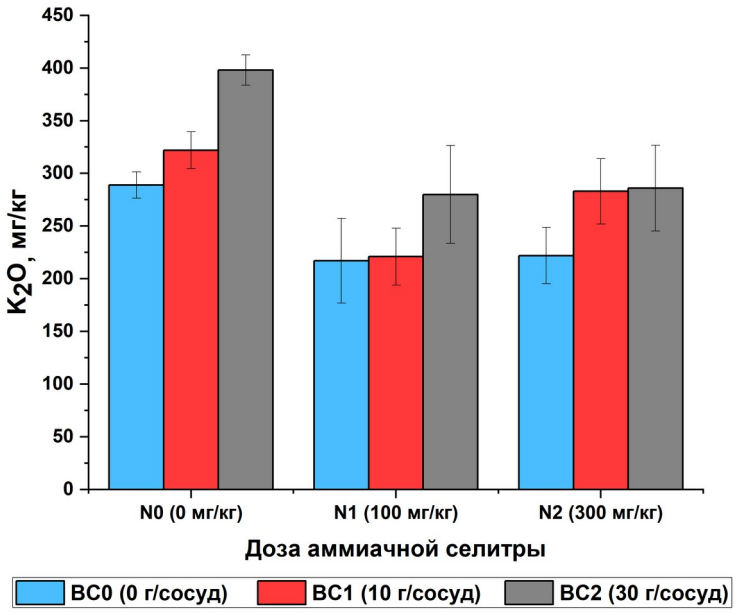

Рисунок 3 - Содержание подвижного калия в почве при различных дозах биочара и аммиачной селитры
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.9.3

Примечание: $НСР_{05}$ = 58 мг/кг

На фоне отсутствия аммиачной селитры повышение дозы биочара сопровождалось ростом содержания обменного калия: 289 мг/кг в BC0-N0, 322 мг/кг в BC1-N0 и 398 мг/кг в BC2-N0. Разница между BC2-N0 и контролем составила 109 мг/кг и превышала НСР0,05, поэтому высокая доза биочара без азотного удобрения достоверно увеличивала содержание K_2O. На фоне N1 значения K_2O составляли 217 мг/кг в BC0-N1, 221 мг/кг в BC1-N1 и 280 мг/кг в BC2-N1. На фоне N2 содержание обменного калия составляло 222 мг/кг без биочара, 283 мг/кг при BC1 и 286 мг/кг при BC2.

Таким образом, при внесении аммиачной селитры в дозах N1 и N2 биочар повышал средние значения K_2O, но эффект был слабее, чем при отсутствии азотного удобрения. Это может быть связано с более активным использованием калия растениями на фоне азотного питания. Содержание обменного калия достоверно зависело как от дозы биочара ($p < 0,01$), так и от дозы аммиачной селитры ($p < 0,01$). Взаимодействие BC × N было недостоверным ($p > 0,05$).

Содержание нитратного азота по вариантам опыта приведено на рисунке 4. Этот показатель изменялся наиболее резко: от 31 до 269 мг/кг. Минимальное значение получено в контрольном варианте BC0-N0, где не вносили ни биочар, ни аммиачную селитру. Максимальное значение отмечено в варианте BC0-N2 при высокой дозе аммиачной селитры без биочара. Разница между этими вариантами составила 280 мг/кг и значительно превышала $НСР_{05}$ = 64,7 мг/кг.

 © Авторы статьи / Authors of the article

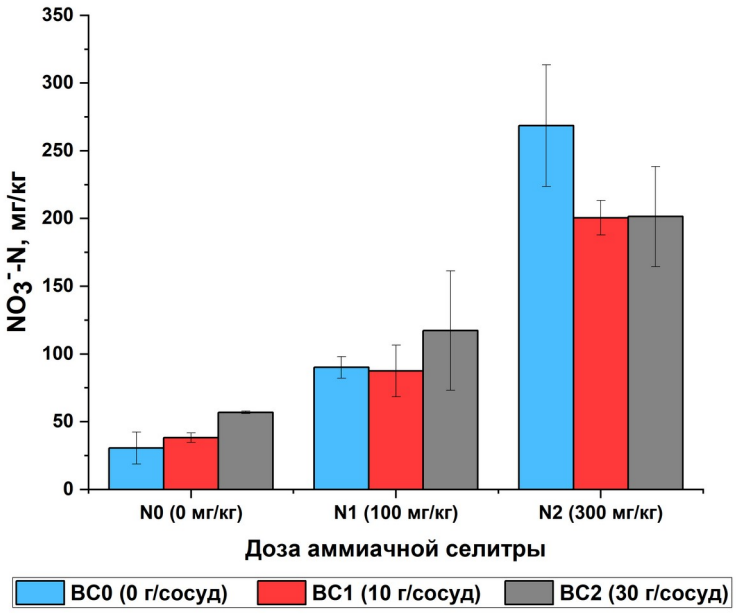

Рисунок 4 - Содержание нитратного азота в почве при различных дозах биочара и аммиачной селитры
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.9.4

Примечание: $НСР_{05}$ = 64,7 мг/кг

В вариантах без азотного удобрения содержание NO_3^--N оставалось низким: 31 мг/кг в BC0-N0, 38 мг/кг в BC1-N0 и 57 мг/кг в BC2-N0. На фоне N1 значения возрастали до 90 мг/кг в BC0-N1, 88 мг/кг в BC1-N1 и 117 мг/кг в BC2-N1. На фоне N2 содержание нитратного азота достигало 269 мг/кг без биочара и снижалось до 201 мг/кг при внесении биочара.

Основным фактором, определявшим содержание нитратного азота, была доза аммиачной селитры: действие N было достоверным ($p < 0,01$). Действие биочара и взаимодействие BC × N статистически не подтверждены ($p > 0,05$), поэтому снижение среднего содержания NO_3^--N с 269 мг/кг в BC0-N2 до 201 мг/кг в вариантах BC1-N2 и BC2-N2, что является выраженной тенденцией к снижению нитратного азота на высоком азотном фоне при внесении биочара.

Полученные данные показывают, что в основном аммиачная селитра формировала уровень нитратного азота в почве. Биочар мог регулировать его остаточное содержание, однако в пределах данного опыта этот эффект не был подтверждён как самостоятельный статистически значимый фактор.

Содержание аммонийного азота представлено на рисунке 5. Значения NH_4^+-N изменялись от 20 до 43 мг/кг. Минимальное значение отмечено в варианте BC0-N1, максимальное — в варианте BC2-N0. Разница между ними составила 22 мг/кг и превышала $НСР_{05}$ = 11,6 мг/кг.

 © Авторы статьи / Authors of the article

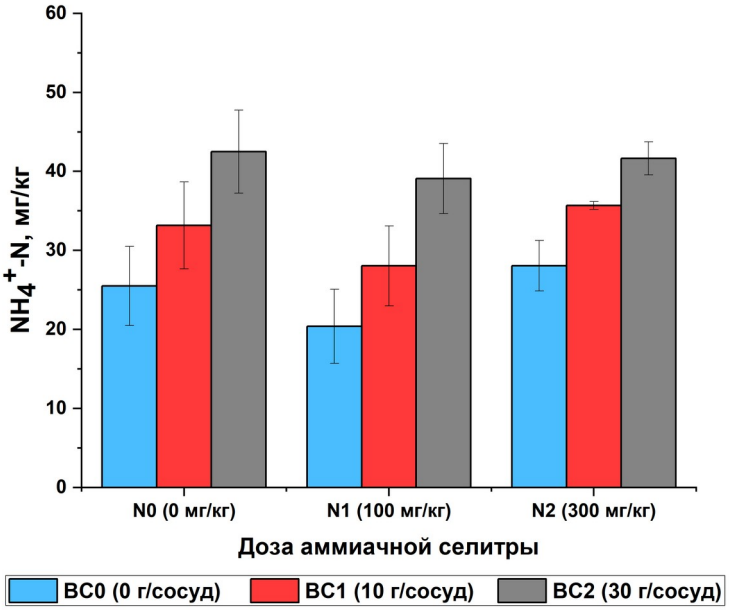

Рисунок 5 - Содержание аммонийного азота в почве при различных дозах биочара и аммиачной селитры
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.9.5

Примечание: $НСР_{05}$ = 11,6 мг/кг

В вариантах без биочара содержание аммонийного азота было относительно низким: 26 мг/кг в BC0-N0, 20 мг/кг в BC0-N1 и 28 мг/кг в BC0-N2. При внесении 10 г биочара значения повышались до 33, 28 и 36 мг/кг соответственно. При внесении 30 г биочара содержание NH_4^+-N составляло 43 мг/кг в BC2-N0, 39 мг/кг в BC2-N1 и 42 мг/кг в BC2-N2.

Дисперсионный анализ показал достоверное действие дозы биочара ($p < 0,01$) на содержание аммонийного азота. Отдельное действие аммиачной селитры и взаимодействие BC × N были недостоверными ($p > 0,05$). Следовательно, накопление или удержание аммонийной формы азота было связано прежде всего с внесением биочара. Особенно ясно это проявлялось при сравнении вариантов BC2 с соответствующими вариантами без биочара: превышение составляло 14–19 мг/кг и в большинстве случаев было выше $НСР_{05}$.

Активность уреазы по вариантам опыта представлена на рисунке 6. Значения изменялись от 48,81 до 78,30 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$. Минимальная активность была получена в варианте BC2-N1, максимальная — в варианте BC2-N2. Разница между ними составила 29,49 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ и превышала НСР0,05 = 12,22, поэтому различие является статистически значимым.

 © Авторы статьи / Authors of the article

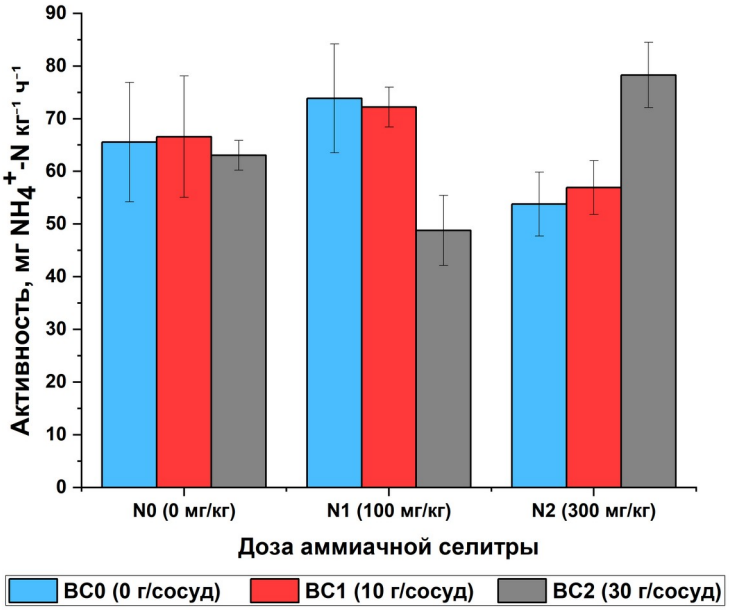

Рисунок 6 - Активность уреазы в почве при различных дозах биочара и аммиачной селитры
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.9.6

Примечание: $НСР_{05}$ = 12,22

В вариантах без биочара активность уреазы составляла 63,84 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC0-N0, 73,88 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC0-N1 и 53,80 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC0-N2. При умеренной дозе биочара значения были близкими: 66,58 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC1-N0, 72,21 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC1-N1 и 56,93 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC1-N2. При высокой дозе биочара: 63,04 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC2-N0, 48,81 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC2-N1 и 78,30 мг N-NH_4^+ $кг^{-1}$ $ч^{-1}$ в BC2-N2.

Отдельное действие биочара и отдельное действие аммиачной селитры на активность уреазы были недостоверными ($p > 0,05$). При этом взаимодействие BC × N было достоверным ($p < 0,01$). Это означает, что уреазная активность определялась не самой дозой биочара или азотного удобрения по отдельности, а их сочетанием. Высокая доза биочара могла как снижать активность уреазы на фоне N1, так и повышать её на фоне N2.

Максимальная активность уреазы в варианте BC2-N2 сочеталась с наиболее высоким pH (6,86) и повышенным содержанием аммонийного азота (49 мг/кг). Это позволяет рассматривать данный вариант как пример согласованного изменения кислотно-основных условий, аммонийной формы азота и ферментативной активности. Однако причинную связь между этими показателями следует формулировать осторожно: по имеющимся данным можно установить совместное изменение, но нельзя полностью разделить вклад pH, азотного фона, микробной активности и сорбционных свойств биочара.

Обсуждение

Сопоставление всех шести показателей свидетельствует о комплексности действия биочара. Для pH и активности уреазы решающим оказалось взаимодействие факторов дозы биочара и аммиачной селитры; для подвижного фосфора — дозы биочара и взаимодействие факторов; для обменного калия — самостоятельное действие биочара и аммиачной селитры; для нитратного азота — дозы аммиачной селитры; для аммонийного азота — дозы биочара.

Влияние биочара на pH почвы сильно зависело от дозы внесения аммиачной селитры. При отсутствии селитры биочар практически не изменял pH почвы. Подщелачивающий эффект биочара наблюдался только в случае внесения высокой дозы аммиачной селитры и высокой дозы биочара. Этот эффект широко описан в литературе и объясняется наличием карбонатов в составе биочара [15], [16]. Во всех остальных случаях выраженного подщелачивающего эффекта от внесения биочара не наблюдалось, что, по всей вероятности, является следствием комплексного воздействия биочара и аммиачной селитры на катионообменные процессы, происходящие в почве, и состав почвенного микробного сообщества [17], [18], [19]. Сложная зависимость pH почвы от внесения биочара подтверждается и результатами мета-анализа 232 работ, посвященных влиянию биочара на кислотность почв [20]. Отсутствие достоверного влияния биочара на pH при наличии значимого взаимодействия BC × N может быть связано с особенностями условий опыта. В настоящем исследовании использовали дерново-подзолистую среднесуглинистую почву с исходным значением pH 6,1. По данным работы И.А. Дубровиной [4], влияние биочара на реакцию среды значительно сильнее проявляется на лёгких кислых почвах, тогда как на более тяжёлых почвах изменение pH выражено существенно слабее. Следовательно, в условиях среднесуглинистой почвы биочар следует рассматривать не столько как средство нейтрализации кислотности, сколько как фактор, регулирующий реакцию среды в зависимости от системы удобрения.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Что касается влияния биочара на содержание подвижного фосфора, то низкая доза биочара не оказывала значительного влияния на содержание подвижного фосфора, а высокая доза биочара его снижала. Полученные результаты соответствуют данным К.О. Пономарева и соавторов [7], которые также показали, что внесение различных видов биочара не всегда сопровождается увеличением содержания подвижного фосфора. Биочар способен снижать подвижность фосфора как благодаря повышению pH и смещению равновесия в сторону образования труднорастворимых фосфатов кальция, так и благодаря связыванию фосфат-ионов с ионами кальция и магния, содержащимися в биочаре [21]. Кроме того, внесение биочара может изменять структуру микробного сообщества почвы и ингибировать фосфат-мобилизующие бактерии, за счет этого влияя на доступность фосфора [22], [23].

Наиболее устойчивый эффект биочара проявлялся в изменении калийного режима. Высокая доза биочара повышала содержание подвижного калия как при внесении аммиачной селитры, так и без нее. Полученные результаты согласуются с литературными данными. В ряде работ было показано существенное увеличение содержания подвижного калия при использовании биочаров различного происхождения [3], [24], [25]. Данный эффект может быть связан с содержанием калия в самом биочаре, достигающем в биочарах древесного происхождения 5% [26]. Снижение подвижного калия с повышением дозы аммиачной селитры связано, скорее всего, с увеличением урожайности пшеницы на фоне улучшения азотного питания и, следовательно, с увеличением выноса калия с урожаем.

Внесение биочара по-разному повлияло на содержание нитратной и аммонийной форм азота. Содержание аммонийного азота повышалось с увеличением дозы биочара и вместе с тем не зависело явным образом от примененной дозы аммиачной селитры. В то же время нитратный азот умеренно повышался при внесении биочара на фоне средней дозы аммиачной селитры или ее отсутствия, а при внесении высокой дозы аммиачной селитры содержание NO_3^--N, напротив, падало при внесении высокой дозы биочара. Таким образом, при внесении высоких доз аммиачной селитры и биочара происходило смещение распределения форм азота в сторону менее подвижной аммонийной формы.

Возможным объяснением повышения содержания как нитратной, так и аммонийной форм азота при внесении биочара в вариантах без внесения аммиачной селитры является прайминг-эффект, при котором внесение биочара стимулирует активность почвенного микробного сообщества и минерализацию органического вещества почвы, увеличивая образование минерального азота [27].

Повышение содержания аммонийного азота при внесении биочара связано с высокой ёмкостью катионного обмена этого материала. Благодаря развитой поверхности и наличию отрицательно заряженных функциональных групп биочар способен эффективно сорбировать и удерживать ионы NH_4^+, снижая их потери из почвенного раствора. Напротив, нитратный азот удерживается биочаром значительно слабее, поскольку анионы NO_3^- практически не сорбируются отрицательно заряженной поверхностью материала [28], [29]. Кроме того, биочар может замедлять процесс нитрификации аммония в почве. Удерживание аммония биочаром уменьшает его доступность для нитрифицирующих микроорганизмов [30], а присутствующие в биочаре фенольные соединения способны оказывать ингибирующее действие на отдельные группы микроорганизмов, участвующих в нитрификации [19]. Совокупность этих процессов объясняет одновременное увеличение содержания NH_4^+-N и снижение содержания NO_3^--N при внесении высоких доз биочара. Полученные результаты согласуются с исследованиями Бойцовой и Рижии, выполненными на дерново-подзолистых почвах [31], [32]. В этих работах также было показано, что внесение биоугля способствует накоплению минерального азота, прежде всего аммонийной формы, при этом выраженность эффекта зависела от степени окультуренности почвы и дозы биоугля.

Анализ активности уреазы подтвердил, что биологический отклик почвы зависит от сочетания биочара и азотного удобрения. Максимальное значение уреазной активности было получено не при отдельном внесении биочара, а при его сочетании с высокой дозой аммиачной селитры. При внесении низкой дозы биочара уреазная активность значимо не изменялась вне зависимости от дозы аммиачной селитры. При внесении высокой дозы биочара уреазная активность снижалась при внесении средней дозы азота и, напротив, повышалась при внесении высокой дозы азота. В целом же, аммиачная селитра незначительно повышала активность уреазы при внесении средней дозы, однако подавляла ее при внесении высокой дозы. Кроме того, не наблюдалось значимой корреляции между содержанием аммонийного ($r = -0,17$) и нитратного ($r = -0,14$) азота в почве и уреазной активностью. Полученные результаты согласуются с данными работы Yang с соавт., которые также показали, что максимальная активность уреазы достигается только при определённом сочетании доз биочара и азотного удобрения [33]. Аналогичные закономерности отмечены в работе Рижии с соавт., выполненной на дерново-подзолистой почве без растений, где изменение активности почвенных ферментов также зависело от дозы биоугля и условий его применения [34]. Любопытно отметить, что несмотря на то, что для измерения активности уреазы использовался боратный буфер с оптимальным pH для этой реакции, наблюдалась корреляция ($r = 0,73$) между pH_{KCl} и активностью данного фермента. Это свидетельствует о повышении количества почвенных микроорганизмов, продуцирующих уреазу, для которых значения pH, близкие к нейтральным, являются предпочтительнее кислых [35]. Кроме того, биочар мог способствовать улучшению аэрации почвы, что также способствует росту микроорганизмов, продуцирующих уреазу [36].

Необходимо отметить, что в большинстве случаев только высокая доза биочара (0,6%) давала выраженный эффект, в то время как низкая доза биочара (0,2%) либо занимала промежуточное положение между контролем и высокой дозой, либо вовсе не обеспечивала статистически значимого изменения большинства изученных показателей. Кроме того, действие низкой дозы биочара зачастую зависело от дозы внесения аммиачной селитры, что может свидетельствовать о конкуренции между различными ионами за центры связывания на поверхности биочара. Подобные наблюдения согласуются с современными представлениями о дозозависимом действии биочара, в соответствии с которыми выраженность изменений физико-химических свойств почвы определяется количеством внесённого биочара, поскольку с увеличением дозы возрастают площадь реакционно-активной поверхности, ёмкость катионного обмена и вклад щелочных минеральных компонентов [1], [16].

 © Авторы статьи / Authors of the article

Заключение

Вегетационный опыт показал, что эффект берёзового биочара на агрохимические и биохимические свойства почвы зависит от дозы и от взаимодействия с аммиачной селитрой: значимого влияния отдельных факторов не выявлено, достоверным оказалось их взаимодействие (BC × N). При сочетании высокой дозы биочара (0,6%) и высокой дозы азота (BC2-N2) pH_{KCl} повысился до 6,86 против 5,91 в варианте без биочара (BC0-N2). При внесении высокой дозы биочара наблюдалось накопление NH_4^+-N (39–43 мг/кг vs 20–28 мг/кг без биочара) и повышение содержания подвижного калия (до 398 мг/кг в BC2-N0), тогда как подвижный фосфор снижался (248–284 мг/кг против 313–326 мг/кг в BC0/BC1). На фоне высокой дозы азота внесение биочара уменьшало содержание NO_3^--N (с 269 до 201 мг/кг) и одновременно повышало NH_4^+-N, что указывает на перераспределение минерального азота в сторону менее подвижной формы. Активность уреазы коррелировала с величиной pH_{KCl}: максимум 78,30 мг $N\text{-}NH_4^+ \cdot кг^{-1} \cdot ч^{-1}$ в BC2-N2, минимум 48,81 в BC2-N1, различия определялись взаимодействием факторов (BC × N).

Финансирование

Работа финансировалась за счет средств Программы развития Российского государственного аграрного университета — МСХА имени К. А. Тимирязева в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Funding

The work was financed by the Development Program of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy within the framework of the Strategic Academic Leadership Program "Priority-2030".

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Agegnehu G. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review / G. Agegnehu, A.K. Srivastava, M.I. Bird // Applied Soil Ecology. — 2017. — № 119. — P. 156–170.

2. Lehmann J. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation / J. Lehmann, S. Joseph. — London : Routledge, 2015. — 944 p.

3. Якименко О.С. Влияние биоугля и гумата калия на свойства дерново-подзолистой почвы в модельном эксперименте / О.С. Якименко, В.С. Журба // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — Т. 12. — № 64. — С. 1–7.

4. Дубровина И.А. Изменение фосфатного режима почв средней тайги при применении биоугля / И.А. Дубровина // Почвоведение. — 2023. — № 3. — С. 405–414.

5. Кулагина В.И. Воздействие совместного внесения биоугля и минеральных азотных удобрений на растения овса посевного и биологические свойства почв / В.И. Кулагина, А.Н. Грачев, Л.М. Сунгатуллина [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Биология. — 2023. — № 61. — С. 27–44.

6. Бетехтина А.А. Изменение свойств почвы и морфометрических параметров пшеницы при внесении биоугля: вегетационный эксперимент / А.А. Бетехтина, О.А. Некрасова, А.В. Малахеева [и др.] // Аграрный вестник Урала. — 2024. — Т. 24. — № 3. — С. 298–308.

7. Пономарев К.О. Влияние биоуглей на концентрацию доступных для растений элементов в почве / К.О. Пономарев, А.А. Дрягина, Е.А. Филимоненко [и др.] // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. — 2024. — № 120. — С. 265–294.

8. Пономарев К.О. Влияние биоугля на развитие яровой пшеницы (Triticum aestivum L.) / К.О. Пономарев // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. — 2022. — № 111. — С. 120–139.

9. Завалин А.А. Биологический и минеральный азот в земледелии России / А.А. Завалин. — Москва : Издательство ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2022. — 288 с.

10. Пахота А.А. Изменение уреазной активности при искусственном загрязнении почвы и внесении биочара / А.А. Пахота, Е.С. Федоренко, М.Р. Крепакова [и др.] // Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине : труды XII Международной биогеохимической школы, посвященной 175-летию со дня рождения В.В. Докучаева. — Тула : Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2021. — С. 163–166.

11. Бакланова О.В. Экологическая роль осадков сточных вод и биочара в восстановлении биологической активности почвы / О.В. Бакланова, Л.В. Брындина, А.Л. Лукин // Проблемы региональной экологии. — 2023. — № 3. — С. 5–9.

12. Kandeler E. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium / E. Kandeler, H. Gerber // Biology and Fertility of Soils. — 1988. — Vol. 6. — P. 68–72.

13. Piotrowska-Długosz A. Assessment of soil nitrogen and related enzymes as influenced by the incorporation time of field pea cultivated as a catch crop in Alfisol / A. Piotrowska-Długosz, E. Wilczewski // Environmental Monitoring and Assessment. — 2014. — Vol. 186. — № 12. — P. 8425–8441.

 © Авторы статьи / Authors of the article

14. Лапушкин В.М. Определение содержания нитратного азота в почве методом УФ-спектрофотометрии / В.М. Лапушкин // Плодородие. — 2025. — № 2. — С. 9–13.

15. Yuan J.-H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures / J.-H. Yuan, R.-K. Xu, H. Zhang // Bioresource Technology. — 2011. — Vol. 102. — № 3. — P. 3488–3497.

16. Joseph S.D. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar / S.D. Joseph, A.L. Cowie, L. Van Zwieten [et al.] // GCB Bioenergy. — 2021. — Vol. 13. — № 1. — P. 1731–1764.

17. Zhu X. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review / X. Zhu, B. Chen, L. Zhu [et al.] // Environmental Pollution. — 2017. — Vol. 227. — P. 98–115.

18. Dorner M. Biochar as ammonia exchange biofilm carrier for enhanced aerobic nitrification in activated sludge / M. Dorner, S. Behrens // Bioresource Technology. — 2024. — Vol. 413. — P. 131374.

19. Shi R.Y. Dissolved biochar fractions and solid biochar particles inhibit soil acidification induced by nitrification through different mechanisms / R.Y. Shi, N. Ni, R.-H. Wang [et al.] // Science of the Total Environment. — 2023. — Vol. 874. — P. 162464.

20. Zhang N. The potential of biochar to mitigate soil acidification: a global meta-analysis / N. Zhang, J. Xing, L. Wei [et al.] // Biochar. — 2025. — Vol. 7. — № 1. — P. 49.

21. Bornø M.L. Contrasting effects of biochar on phosphorus dynamics and bioavailability in different soil types / M.L., Bornø, D.S. Müller-Stöver, F. Liu // Science of the Total Environment. — 2018. — Vol. 627. — P. 963–974.

22. Yang L. Mechanistic understanding of biochar-induced inhibition of *Bacillus megaterium* growth and soil phosphorus solubilization / L. Yang, L. Zhu, J. Zhang [et al.] // Pedosphere. — 2026. — Vol. 36. — № 2. — P. 655–668.

23. Qin H. Effects of biochar on phosphorus fraction, phosphatase activity, and phosphorus-solubilizing bacterial abundance: a phosphorus-depleted biochar design / H. Qin, X. Huan, J. Cui [et al.] // Frontiers in Environmental Science. — 2025. — Vol. 13. — P. 1663371.

24. Кулагина В.И. Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия / В.И. Кулагина, А.Н. Грачев, Р.Р. Шагидуллин [и др.] // Аграрный научный журнал. — 2019. — № 1. — С. 16–20.

25. Evangelou M.W. Soil application of biochar produced from biomass grown on trace element contaminated land / M.W. Evangelou, A. Brem, F. Ugolini [et al.] // Journal of Environmental Management. — 2014. — Vol. 146. — P. 100–106.

26. Pyo M. Wood-based micro-biochars in a cement mixture / M. Pyo, J. Kim, S. Seok [et al.] // Molecules. — 2025. — Vol. 30. — № 9. — P. 1898.

27. Dong H. Priming effects on soil organic matter mineralization by carbon substrates: a global meta-analysis / H. Dong, Y. Fu, S. Dai [et al.] // Global Change Biology. — 2026. — Vol. 32. — № 4. — P. 641–655.

28. Gelardi D.L. Biochar alters hydraulic conductivity and impacts nutrient leaching in two agricultural soils / D.L. Gelardi, I.H. Ainuddin, D.A. Rippner [et al.] // SOIL. — 2021. — Vol. 7. — № 2. — P. 811–825.

29. Adhikari S. Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils / S. Adhikari, E. Moon, W. Timms // Journal of Cleaner Production. — 2024. — Vol. 446. — P. 141454.

30. Luo L. Biochar for mitigating nitrate leaching in agricultural soils: mechanisms, challenges, and future directions / L. Luo, J. Li, Z. Xing [et al.] // Water. — 2025. — Vol. 17. — P. 2590.

31. Бойцова Л.В. Содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности при внесении в нее биоугля / Л.В. Бойцова, Е.Я. Рижия, М.А. Москвин // Агрохимия. — 2021. — № 11. — С. 25–32.

32. Рижия Е.Я. Влияние биоугля на содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности / Е.Я. Рижия, Н.П. Бучкина, Е.В. Балашов // Агрохимия. — 2020. — № 8. — С. 22–29.

33. Yang W. Effects of nitrogen fertilizer and biochar levels on soil CO_2 emission and wheat yield in irrigation region / W. Yang, L. Zhang, Y. Chen [et al.] // Frontiers in Agronomy. — 2024. — Vol. 6. — P. 1487500.

34. Рижия Е.Я. Ферментативная активность и эмиссия закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы с биоуглем / Е.Я. Рижия, И.М. Мухина, В.Е. Вертебный [и др.] // Сельскохозяйственная биология. — 2017. — Т. 52. — № 3. — С. 464–470.

35. Fisher K.A. Soil urease activity and bacterial ureC gene copy numbers: effect of pH / K.A. Fisher, S.A. Yarwood, B.R. James // Geoderma. — 2017. — Vol. 285. — P. 1–8.

36. Chen H. Response of Soil N_2O Emissions to Soil Microbe and Enzyme Activities with Aeration at Two Irrigation Levels in Greenhouse Tomato (*Lycopersicon esculentum Mill.*) Fields / H. Chen, Z. Shang, H. Cai [et al.] // Atmosphere. — 2019. — Vol. 10. — № 2. — P. 72.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Agegnehu G. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review / G. Agegnehu, A.K. Srivastava, M.I. Bird // Applied Soil Ecology. — 2017. — № 119. — P. 156–170.

2. Lehmann J. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation / J. Lehmann, S. Joseph. — London : Routledge, 2015. — 944 p.

3. Yakimenko O.S. Vliyanie biouglya i gumata kaliya na svoistva dernovo-podzolistoi pochvi v modelnom eksperimente [The influence of biochar and potassium humate on the properties of soddy podzolic soil in a model experiment] / O.S. Yakimenko, V.S. Zhurba // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — T. 12. — № 64. — P. 1–7. [in Russian]

4. Dubrovina I.A. Izmenenie fosfatnogo rezhima pochv srednej tajgi pri primenenii biouglya [Changing the Phosphate Regime of Soils in the Middle Taiga When Using Biochar] / I.A. Dubrovina // Soil Science. — 2023. — № 3. — P. 405–414. [in Russian]

5. Kulagina V.I. Vozdeistvie sovmestnogo vneseniya biouglya i mineralnikh azotnikh udobrenii na rasteniya ovsa posevnogo i biologicheskie svoistva pochv [Effect of combined application of biochar and mineral nitrogen fertilizers on oat plants and biological properties of soils] / V.I. Kulagina, A.N. Grachev, L.M. Sungatullina [et al.] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya [Tomsk State University Bulletin. Biology]. — 2023. — № 61. — P. 27–44. [in Russian]

6. Betekhtina A.A. Izmenenie svoistv pochvi i morfometricheskikh parametrov pshenitsi pri vnesenii biouglya: vegetatsionnii eksperiment [Changes in soil properties and morphometric parameters of wheat under biochar application: pot experiment] / A.A. Betekhtina, O.A. Nekrasova, A.V. Malakheeva [et al.] // Agrarnii vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]. — 2024. — T. 24. — № 3. — P. 298–308. [in Russian]

7. Ponomarev K.O. Vliyanie biouglei na kontsentratsiyu dostupnikh dlya rastenii elementov v pochve [Effect of biochars on the concentration of plant-available elements in soil] / K.O. Ponomarev, A.A. Dryagina, E.A. Filimonenko [et al.] // Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva [Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute]. — 2024. — № 120. — P. 265–294. [in Russian]

8. Ponomarev K.O. Vliyanie biouglya na razvitie yarovoj pshenicy' (Triticum aestivum L.) [Effect of biochar on the development of spring wheat (*Triticum aestivum*L.)] / K.O. Ponomarev // Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. — 2022. — № 111. — P. 120–139. [in Russian]

9. Zavalin A.A. Biologicheskii i mineralnii azot v zemledelii Rossii [Biological and mineral nitrogen in Russian agriculture] / A.A. Zavalin. — Moscow : Publishing House of the All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishniko, 2022. — 288 p. [in Russian]

10. Pakhota A.A. Izmenenie ureaznoi aktivnosti pri iskusstvennom zagryaznenii pochvi i vnesenii biochara [Changes in urease activity under artificial soil contamination and biochar application] / A.A. Pakhota, E.S. Fedorenko, M.R. Krepakova [et al.] // Fundamental'nye osnovy biogeohimicheskih tekhnologij i perspektivy ih primeneniya v ohrane prirody, sel'skom hozyajstve i medicine [Fundamentals of biogeochemical technologies and prospects for their application in nature conservation, agriculture and medicine] : proceedings of the XII International Biogeochemical School dedicated to the 175th anniversary of V.V. Dokuchaev. — Tula : Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, 2021. — P. 163–166. [in Russian]

11. Baklanova O.V. E'kologicheskaya rol' osadkov stochny'x vod i biochara v vosstanovlenii biologicheskoj aktivnosti pochvy' [Ecological role of sewage sludge and biochar in restoring soil biological activity] / O.V. Baklanova, L.V. Bry'ndina, A.L. Lukin // Regional Environmental Issues. — 2023. — № 3. — P. 5–9. [in Russian]

12. Kandeler E. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium / E. Kandeler, H. Gerber // Biology and Fertility of Soils. — 1988. — Vol. 6. — P. 68–72.

13. Piotrowska-Długosz A. Assessment of soil nitrogen and related enzymes as influenced by the incorporation time of field pea cultivated as a catch crop in Alfisol / A. Piotrowska-Długosz, E. Wilczewski // Environmental Monitoring and Assessment. — 2014. — Vol. 186. — № 12. — P. 8425–8441.

14. Lapushkin V.M. Opredelenie soderzhaniya nitratnogo azota v pochve metodom UF-spektrofotometrii [Determination of nitrate nitrogen content in soil by UV spectrophotometry] / V.M. Lapushkin // Fertility. — 2025. — № 2. — P. 9–13. [in Russian]

15. Yuan J.-H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures / J.-H. Yuan, R.-K. Xu, H. Zhang // Bioresource Technology. — 2011. — Vol. 102. — № 3. — P. 3488–3497.

16. Joseph S.D. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar / S.D. Joseph, A.L. Cowie, L. Van Zwieten [et al.] // GCB Bioenergy. — 2021. — Vol. 13. — № 1. — P. 1731–1764.

17. Zhu X. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review / X. Zhu, B. Chen, L. Zhu [et al.] // Environmental Pollution. — 2017. — Vol. 227. — P. 98–115.

18. Dorner M. Biochar as ammonia exchange biofilm carrier for enhanced aerobic nitrification in activated sludge / M. Dorner, S. Behrens // Bioresource Technology. — 2024. — Vol. 413. — P. 131374.

19. Shi R.Y. Dissolved biochar fractions and solid biochar particles inhibit soil acidification induced by nitrification through different mechanisms / R.Y. Shi, N. Ni, R.-H. Wang [et al.] // Science of the Total Environment. — 2023. — Vol. 874. — P. 162464.

20. Zhang N. The potential of biochar to mitigate soil acidification: a global meta-analysis / N. Zhang, J. Xing, L. Wei [et al.] // Biochar. — 2025. — Vol. 7. — № 1. — P. 49.

21. Bornø M.L. Contrasting effects of biochar on phosphorus dynamics and bioavailability in different soil types / M.L., Bornø, D.S. Müller-Stöver, F. Liu // Science of the Total Environment. — 2018. — Vol. 627. — P. 963–974.

22. Yang L. Mechanistic understanding of biochar-induced inhibition of *Bacillus megaterium* growth and soil phosphorus solubilization / L. Yang, L. Zhu, J. Zhang [et al.] // Pedosphere. — 2026. — Vol. 36. — № 2. — P. 655–668.

23. Qin H. Effects of biochar on phosphorus fraction, phosphatase activity, and phosphorus-solubilizing bacterial abundance: a phosphorus-depleted biochar design / H. Qin, X. Huan, J. Cui [et al.] // Frontiers in Environmental Science. — 2025. — Vol. 13. — P. 1663371.

24. Kulagina V.I. Vliyanie biouglya na strukturu pochvi i soderzhanie form kaliya [Influence of biochar on the soil structure and the content of potassium forms] / V.I. Kulagina, A.N. Grachev, R.R. Shagidullin [et al.] // Agrarnii nauchnii zhurnal [The Agrarian Scientific Journal]. — 2019. — № 1. — P. 16–20. [in Russian]

25. Evangelou M.W. Soil application of biochar produced from biomass grown on trace element contaminated land / M.W. Evangelou, A. Brem, F. Ugolini [et al.] // Journal of Environmental Management. — 2014. — Vol. 146. — P. 100–106.

26. Pyo M. Wood-based micro-biochars in a cement mixture / M. Pyo, J. Kim, S. Seok [et al.] // Molecules. — 2025. — Vol. 30. — № 9. — P. 1898.

 © Авторы статьи / Authors of the article

27. Dong H. Priming effects on soil organic matter mineralization by carbon substrates: a global meta-analysis / H. Dong, Y. Fu, S. Dai [et al.] // Global Change Biology. — 2026. — Vol. 32. — № 4. — P. 641–655.

28. Gelardi D.L. Biochar alters hydraulic conductivity and impacts nutrient leaching in two agricultural soils / D.L. Gelardi, I.H. Ainuddin, D.A. Rippner [et al.] // SOIL. — 2021. — Vol. 7. — № 2. — P. 811–825.

29. Adhikari S. Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils / S. Adhikari, E. Moon, W. Timms // Journal of Cleaner Production. — 2024. — Vol. 446. — P. 141454.

30. Luo L. Biochar for mitigating nitrate leaching in agricultural soils: mechanisms, challenges, and future directions / L. Luo, J. Li, Z. Xing [et al.] // Water. — 2025. — Vol. 17. — P. 2590.

31. Boitsova L.V. Soderzhanie mineralnikh form azota v dernovo-podzolistoi supeschanoi pochve raznoi stepeni okulturennosti pri vnesenii v nee biouglya [Mineral nitrogen content in sod-podzolic sandy soils of different fertility after application of biochar] / L.V. Boitsova, E.Ya. Rizhiya, M.A. Moskvin // Agrokhimiya [Agrochemistry]. — 2021. — № 11. — P. 25–32. [in Russian]

32. Rizhiya E.Ya. Vliyanie biouglya na soderzhanie mineralnikh form azota v dernovo-podzolistoi supeschanoi pochve s raznoi stepenyu okulturennosti [Effect of biochar on mineral nitrogen forms in sod-podzolic sandy loam soil with different cultivation levels] / E.Ya. Rizhiya, N.P. Buchkina, E.V. Balashov // Agrokhimiya [Agrochemistry]. — 2020. — № 8. — P. 22–29. [in Russian]

33. Yang W. Effects of nitrogen fertilizer and biochar levels on soil CO_2 emission and wheat yield in irrigation region / W. Yang, L. Zhang, Y. Chen [et al.] // Frontiers in Agronomy. — 2024. — Vol. 6. — P. 1487500.

34. Rizhiya E.Ya. Fermentativnaya aktivnost i emissiya zakisi azota iz dernovo-podzolistoi supeschanoi pochvi s biouglem [Enzymatic activity and nitrous oxide emission from biochar-amended sod-podzolic sandy loam soil] / E.Ya. Rizhiya, I.M. Mukhina, V.E. Vertebnii [et al.] // Selskokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]. — 2017. — T. 52. — № 3. — P. 464–470. [in Russian]

35. Fisher K.A. Soil urease activity and bacterial ureC gene copy numbers: effect of pH / K.A. Fisher, S.A. Yarwood, B.R. James // Geoderma. — 2017. — Vol. 285. — P. 1–8.

36. Chen H. Response of Soil N_2O Emissions to Soil Microbe and Enzyme Activities with Aeration at Two Irrigation Levels in Greenhouse Tomato (*Lycopersicon esculentum Mill.*) Fields / H. Chen, Z. Shang, H. Cai [et al.] // Atmosphere. — 2019. — Vol. 10. — № 2. — P. 72.