

ИЗМЕНЕНИЕ ФОСФАТНОГО РЕЖИМА ПОЧВ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БИОУГЛЯ

© 2023 г. И. А. Дубровина*

Институт биологии КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия

*e-mail: vorgo@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.

После доработки 07.11.2022 г.

Принята к публикации 08.11.2022 г.

В лабораторных экспериментах исследовали влияние древесного биоугля (biochar) на содержание различных форм фосфатов на почвах с разной обеспеченностью фосфором. В работе использовали почвы среднетаежной подзоны Карелии – агрозем альфегумусовый иллювиально-железистый песчаный (Umbric Podzol) и агрозем текстурно-дифференцированный типичный тяжелосуглинистый (Umbric Retisol). В опытах изучали влияние биоугля двух фракций: 3–5 и ≤2 мм в количестве 2 и 5% от массы почвы на показатель pH_{KCl} , содержание подвижного и общего фосфора, фракционный состав фосфатов (метод Чанга–Джексона), общую фосфатную активность почвы, а также эффект раздельного и совместного применения биоугля и удобрения (азофоски) на содержание подвижного фосфора в вегетационном опыте с ячменем яровым. Выявили, что в агроземе альфегумусовом биоуголь достоверно повышал содержание подвижного фосфора на 20–40%, увеличивал содержание фракции Са-фосфатов, алюмофосфатов и рыхлосвязанных фосфатов, а также усиливал активность фосфатазы. В вегетационном опыте отмечено более высокое содержание P_2O_5 в вариантах с биоуглем ≤2 мм, с удобрением и достоверное взаимное влияние факторов биоугля и удобрения. В агроземе текстурно-дифференцированном биоуголь увеличивал содержание подвижного фосфора на 2–6%, повышал содержание Са-фосфатов и рыхлосвязанных фосфатов (с биоуглем ≤2 мм в 5% дозировке) и не оказывал существенного влияния на активность фосфатазы. В вегетационном опыте достоверное влияние оказывало лишь сочетание биоугля ≤2 мм и удобрения. В целом наиболее заметный эффект практически на все исследованные показатели оказывала фракция биоугля ≤2 мм в 5%-ной дозировке. Применение биоугля приводило к статистически значимому увеличению значений pH_{KCl} и не влияло на содержание валового фосфора в обеих почвах. Большой эффект биоуголь оказывал на фосфатный режим почвы легкого гранулометрического состава с изначально более низким pH и меньшим содержанием подвижного и валового фосфора.

Ключевые слова: биоуголь, подвижный фосфор, валовый фосфор, фракционный состав минеральных фосфатов, фосфатаза, модельный эксперимент, Umbric Podzol, Umbric Retisol

DOI: 10.31857/S0032180X22601116, **EDN:** HBMRMC

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор является одним из основных необходимых для растений макроэлементов, он входит в состав нуклеиновых кислот, АТФ, фосфолипидов и ферментов. Поскольку фосфор участвует в энергетическом обмене клеток, его дефицит приводит к снижению активности дыхания, фотосинтеза, и синтеза хлорофилла, особенно на начальной стадии развития растений. Концентрация фосфора в почвах зависит от генезиса почвообразующих пород, их химического и минералогического состава. Среднее содержание фосфора в земной коре составляет 0.12%, а в почвах колеблется от сотых до десятых долей процента [10]. Несмотря на то, что валовые запасы фосфора в почвах довольно значительны, он находится в основном в мало

доступной для растений форме и большинство почв мира испытывают дефицит фосфатов. В России почвы с недостаточным содержанием подвижного фосфора составляют до 80% пахотного фонда [15].

Запасы почвенного фосфора пополняются в основном за счет внесения органических и минеральных удобрений. Регулярное применение фосфорных удобрений ведет к накоплению как общего, так и доступного фосфора, но наибольший сдвиг наблюдается в группе минеральных соединений алюминия, железа и кальция [8]. Фосфаты включаются в разнообразие химические, физико-химические и биологические почвенные процессы. Считается, что всего 5–30% от внесенного количества удобрений поглощается растениями из-за процессов осаждения, сорбции

и микробной иммобилизации [34]. Фосфорные удобрения, по сравнению с азотными и калийными, имеют значительное негативное влияние на экосистемы. В природном фосфатном сырье, а также полученных из него удобрениях, содержатся токсичные примеси и тяжелые металлы [11]. Несмотря на то, что миграция фосфатов по профилю считается слабой, соединения фосфора могут обладать значительной подвижностью вследствие насыщения анионной емкости и являются основной причиной эвтрофикации водоемов [5, 7].

Внесение органических материалов и регулирование кислотности почв с помощью известкования традиционно используется для повышения эффективности удобрений и биодоступности фосфора [4, 6]. С целью поддержания устойчивого сельскохозяйственного производства, продуктивного использования запасов почвенного фосфора и уменьшения его потерь в агроэкосистемах можно применять новые подходы и материалы. В последние годы активно исследуется биоуголь как эффективный мелиорант и удобрение для почвы. Биоуголь производится из органической биомассы (древесина, пожнивные остатки, осадок сточных вод) путем пиролиза без доступа кислорода при относительно низких температурах (до 700°C). Влияние биоугля на почвенные свойства многообразно благодаря высокой емкости обмена, большой удельной поверхности, значительному содержанию углерода и различных минеральных элементов [38]. Использование биоугля может оказывать прямое и косвенное влияние на фосфатный режим почв [24]. Применение биоугля изменяет физико-химический состав почвы (рН, емкость катионного обмена, вододерживающую способность, стабильность агрегатов) и влияет на окислительно-восстановительные реакции, комплексообразование, адсорбцию и осаждение, которые определяют доступность фосфора [17, 18, 36]. Прямое внесение фосфатов возможно с биоуглями с высоким содержанием обменного фосфора и его растворимых солей. Биоуголь может сорбировать соединения фосфора и снижать его доступность и выщелачивание [32, 39]. Изменения в почвенной среде, опосредованные биоуглем, влияют на структуру микробного сообщества и активность некоторых почвенных ферментов [24, 31, 37]. Биоугли имеют широкий диапазон физических и химических свойств и условий пиролиза, что в сочетании с различными типами почв может приводить к контрастным эффектам влияния на почвенный цикл фосфора [21, 25].

Почвы зоны дерново-подзолистых почв обладают повышенной кислотностью, что неблагоприятно сказывается на их фосфатном режиме и является одним из главных факторов низкой продуктивности растениеводства, следовательно ис-

пользование биоугля в данных почвах может рассматриваться как перспективная технология.

Цель работы – изучение влияния биоугля на содержание подвижного и общего фосфора, фракционный состав фосфатов, фосфатазную активность почв, а также эффект отдельного и совместного применения биоугля и удобрения на содержание подвижного фосфора.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для закладки лабораторных опытов использовали почвы с участков, вовлеченных в сельскохозяйственное использование (средняя тайга Карелии), различающиеся по гранулометрическому составу и плодородию. Почвы отбирали из верхнего пахотного горизонта 0–20 см, высушивали до воздушно-сухого состояния, растирали и просеивали через сито 2 мм. Агрозем альфегумусовый иллювиально-железистый песчаный (Umbric Podzol) отбирали на Корзинском научном стационаре ФИЦ КарНЦ РАН. Почва содержит 4.1% частиц <0.01 мм, рН_{KCl} – 4.5, C_{орг} – 1.5%,

N_{общ} – 0.12%, N–NH₄⁺ – 8 мг/кг, N–NO₃[–] – 24 мг/кг, P₂O₅ (по Кирсанову) – 144 мг/кг, K₂O (по Кирсанову) – 20 мг/кг, сумма обменных оснований (S) – 2.0 смоль(экв)/кг. Агрозем текстурно-дифференцированный типичный тяжелосуглинистый (Umbric Retisol) отобран на Агробиологической станции ФИЦ КарНЦ РАН. Почва содержит 42.6% частиц <0.01 мм, рН_{KCl} – 5.1, C_{орг} – 2.5%,

N_{общ} – 0.19%, N–NH₄⁺ – 12 мг/кг, N–NO₃[–] – 29 мг/кг, P₂O₅ (по Кирсанову) – 317 мг/кг, K₂O (по Кирсанову) – 55 мг/кг, S – 7.8 смоль(экв)/кг. В опытах применяли уголь древесный (БУ) (ГОСТ 7657–84, марка А) двух фракций – 3–5 и ≤2 мм. Биоуголь имеет плотность 0.37 г/см³, рН_{H₂O} – 9.3, рН_{KCl} – 7.9, содержит в воздушно-сухой навеске золы – 2.8%, С – 81%, N – 0.35%, К – 0.24%, Р – 0.026%, Са – 0.83%, Mg – 0.20%.

Опыт 1. Воздушно-сухие навески почв массой 500 г помещали в литровые сосуды и добавляли уголь разных фракций в количестве 10 г (2% от массы почвы) и 25 г (5% от массы почвы). Контролем служили образцы почв без добавления угля. Образцы увлажняли дистиллированной водой до полного водонасыщения и тщательно перемешивали. Сосуды оставляли открытыми до полного высыхания, смачивание и перемешивание повторяли 5 циклов. Продолжительность компостирования составляла 100 дней при температуре 20°C. Повторность опыта и аналитических исследований трехкратная. После завершения эксперимента сухие почвенные образцы просеивали через сито 1 мм и выполняли следующие анализы: рН_{KCl} потенциметрически с использованием ион-селективного электрода на иономере АНИОН

4100 “Инфраспак-Аналит”; содержание подвижного фосфора (P_2O_5) по Кирсанову (0.2 М НСl) при использовании в качестве восстановителя аскорбиновой кислоты; содержание валового фосфора ($P_2O_5_{\text{общ}}$) методом сплавления в муфеле и фракционный состав минеральных фосфатов методом Чанга–Джексона в варианте Аскинази–Гинзбург–Лебедевой при использовании в качестве восстановителя $SnCl_2$. Для всех определений фосфора окончание спектрофотометрическое на спектрофотометре UV-1800 Shimadzu [13].

Опыт 2. Схема аналогична опыту 1, но навески почвы с биоуглем помещали в кюветы, смачивали дистиллированной водой и поддерживали влажность 60% ППВ при температуре 25°C. На 7 и 30 сут отбирали образцы и определяли общую фосфатазную активность почв по методу Геллер и Гинзбург со спектрофотометрическим окончанием при использовании в качестве восстановителя $SnCl_2$ [14].

Опыт 3. Вегетационный опыт с ячменем яровым (*Hordeum vulgare* L.) проводили по следующей схеме. Навеску почвы 500 г помещали в вегетационные сосуды объемом 1 л, в варианты с биоуглем вносили уголь в количествах аналогичных опыту 1, смачивали, перемешивали и оставляли на 1 неделю. Через неделю в варианты с удобрением вносили удобрение в жидком виде. Использовали азофоску (АЗФК) марки NPK 16 : 16 : 16 (ГОСТ 19691-84) в количестве 50 мг удобрения на сосуд. Через 2 сут высевали пророщенные семена ячменя по 15 шт./сосуд. Опыт проводили при естественном освещении и температуре воздуха 22–23°C в трехкратной повторности. Для каждой почвы применяли следующую схему опыта: 1) Контроль; 2) АЗФК; 3) БУ ≤ 2 мм 2%; 4) БУ ≤ 2 мм 5%; 5) БУ 3–5 мм 2%; 6) БУ 3–5 мм 5%; 7) БУ ≤ 2 мм 2% + АЗФК; 8) БУ ≤ 2 мм 5% + АЗФК; 9) БУ 3–5 мм 2% + АЗФК; 10) БУ 3–5 мм 5% + АЗФК. Через 40 сут после посева в фазе выхода в трубку в почве определяли содержание подвижного фосфора (P_2O_5) по Кирсанову.

Для обработки данных использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорным анализом по критерию Тьюки при уровне значимости $p \leq 0.05$, корреляционно-регрессионный анализ, а также двухфакторный дисперсионный анализ (Factorial ANOVA). В таблицах и диаграммах приведены средние значения ± ошибка среднего, статистически значимые различия обозначены разными буквами. В работе использовали пакеты анализа PAST Statistics и Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе 100-дневного эксперимента установлено, что внесение биоугля оказывало существен-

ное влияние на показатели рН солевого в обеих почвах (табл. 1). Значения рН возрастали во всех вариантах опыта (различия статистически значимы) по сравнению с контролем. Наибольший эффект оказывала мелкая фракция биоугля в 5%-ной дозировке в обеих почвах. Содержание подвижного фосфора при применении биоугля в агроземе альфегумусовом увеличивалось значительно и достоверно на 20–40% во всех вариантах. В агроземе текстурно-дифференцированном увеличение содержания P_2O_5 происходило на 2–6%, разница с контролем была достоверна не для всех вариантов. Содержание валового фосфора в опыте при внесении биоугля значимо не изменялось для обеих почв.

Внесение биоугля по-разному воздействовало на фракционный состав фосфатов в исследованных почвах (табл. 2). В агроземе альфегумусовом на 20–30% возрастало содержание фракции рыхлосвязанных фосфатов в вариантах с 5% дозировкой, а также происходило увеличение фракции алюмофосфатов на 5–10% во всех вариантах с биоуглем, различия статистически достоверны. Увеличение содержания Са-фосфатов наблюдалось во всех вариантах с биоуглем, наиболее значительный рост (на 58%) отмечен в варианте с мелким углем в 5% дозировке. Содержание железозосфатов, напротив, уменьшалось примерно на 30% в вариантах с биоуглем. Суммарное содержание минеральных фосфатов незначительно возрастало на 3–6% в некоторых вариантах с биоуглем. В агроземе текстурно-дифференцированном значительное увеличение содержания рыхлосвязанных фосфатов (на 58%) наблюдалось лишь в варианте с 5% дозировкой мелкого угля. Достоверно уменьшалось содержание алюмофосфатов на 3–9% по сравнению с контрольным вариантом, и железозосфатов в варианте с мелким углем в 5% дозировке на 14%. Содержание Са-фосфатов возрастало на 13–60% во всех вариантах с биоуглем. Сумма минеральных фосфатов имела тенденцию к увеличению в вариантах с 5% дозировкой биоугля в пределах статистической погрешности.

Исследованная в опыте 2 общая фосфатазная активность имела различную динамику и направленность в зависимости от типа почвы (рис. 1). В контрольных вариантах активность фосфатазы имела сопоставимые уровни в обеих почвах и составляла на 7 сут эксперимента 176–207 мг P_2O_5 /(кг почвы 2 ч), а на 30 сут снижалась до 125–145 мг P_2O_5 /(кг почвы 2 ч). В агроземе альфегумусовом в вариантах с 2%-ным содержанием биоугля на 7 сут эксперимента активность фосфатазы достоверно снижалась на 21–28%, и напротив, в вариантах с 5% дозировкой угля возрастала на 10–37%. Через 30 сут активность фермента в вариантах с содержанием биоугля 2% увеличилась

Таблица 1. Показатели pH_{KCl} , подвижного и общего фосфора (опыт 1)

Вариант	pH_{KCl}	P_2O_5 , мг/кг	$P_2O_{5общ}$, %
Агрозем альфегумусовый			
Контроль	$4.53 \pm 0.01a$	$144 \pm 0.57a$	$0.139 \pm 0.02a$
БУ ≤ 2 мм 2%	$5.53 \pm 0.01b$	$172 \pm 0.33b$	$0.139 \pm 0.01a$
БУ ≤ 2 мм 5%	$6.23 \pm 0.02c$	$207 \pm 2.88c$	$0.140 \pm 0.01a$
БУ 3–5 мм 2%	$4.99 \pm 0.08d$	$186 \pm 0.57d$	$0.140 \pm 0.01a$
БУ 3–5 мм 5%	$5.35 \pm 0.05b$	$195 \pm 1.15e$	$0.138 \pm 0.02a$
Агрозем текстурно-дифференцированный			
Контроль	$5.09 \pm 0.01a$	$317 \pm 0.88a$	$0.257 \pm 0.01a$
БУ ≤ 2 мм 2%	$5.83 \pm 0.01b$	$332 \pm 0.33b$	$0.251 \pm 0.01a$
БУ ≤ 2 мм 5%	$6.21 \pm 0.01c$	$336 \pm 0.58b$	$0.250 \pm 0.01a$
БУ 3–5 мм 2%	$5.43 \pm 0.01d$	$323 \pm 3.46a$	$0.253 \pm 0.01a$
БУ 3–5 мм 5%	$5.76 \pm 0.01e$	$332 \pm 2.02b$	$0.255 \pm 0.01a$

Примечание. Приведены средние значения \pm ошибка среднего, значимые различия при $p \leq 0.05$ обозначены разными буквами.

Таблица 2. Фракционный состав фосфатов, мг/кг почвы (опыт 1)

Вариант	R–P	Al–P	Fe–P	Ca–P	Сумма
Агрозем альфегумусовый					
Контроль	$5.9 \pm 0.61a$	$485.6 \pm 0.89a$	$108.1 \pm 6.06a$	$61.1 \pm 2.54a$	$660.7 \pm 3.81a$
БУ ≤ 2 мм 2%	$6.1 \pm 0.23a$	$496.1 \pm 2.65ab$	$107.7 \pm 6.09a$	$74.0 \pm 0.60ac$	$683.9 \pm 4.47b$
БУ ≤ 2 мм 5%	$7.9 \pm 0.54b$	$514.6 \pm 7.04b$	$79.9 \pm 2.63b$	$96.8 \pm 5.51b$	$699.1 \pm 1.65c$
БУ 3–5 мм 2%	$6.3 \pm 0.32a$	$508.1 \pm 4.24b$	$73.2 \pm 2.36b$	$75.8 \pm 2.71c$	$663.3 \pm 0.52a$
БУ 3–5 мм 5%	$7.4 \pm 1.06b$	$534.4 \pm 3.92c$	$78.5 \pm 2.97b$	$63.4 \pm 0.17ac$	$683.6 \pm 2.19b$
Агрозем текстурно-дифференцированный					
Контроль	$17.3 \pm 1.21a$	$804.0 \pm 4.33a$	$123.4 \pm 4.73a$	$133.7 \pm 2.56a$	$1078.4 \pm 10.42a$
БУ ≤ 2 мм 2%	$16.7 \pm 0.35a$	$778.6 \pm 1.47b$	$124.0 \pm 1.82a$	$150.6 \pm 1.01ab$	$1069.8 \pm 1.70a$
БУ ≤ 2 мм 5%	$27.4 \pm 0.98b$	$780.8 \pm 6.55b$	$106.4 \pm 0.40b$	$214.6 \pm 9.12c$	$1129.2 \pm 1.18a$
БУ 3–5 мм 2%	$16.5 \pm 0.17a$	$734.1 \pm 5.34c$	$123.2 \pm 0.95a$	$171.7 \pm 2.08b$	$1078.8 \pm 9.90a$
БУ 3–5 мм 5%	$18.8 \pm 0.20a$	$781.4 \pm 0.15b$	$126.3 \pm 1.07a$	$197.3 \pm 3.89c$	$1123.8 \pm 5.31a$

Примечание: R–P – рыхлосвязанные фосфаты. Приведены средние значения \pm ошибка среднего, значимые различия при $p \leq 0.05$ обозначены разными буквами.

на 142–162% по сравнению с контролем, а варианты с 5%-ным содержанием угля показали снижение активности фосфатазы на 23–46% по сравнению с предыдущим измерением. В агроземе текстурно-дифференцированном через 7 сут опыта измерение показало уменьшение активности фермента на 5–33% (достоверно не для всех вариантов). На 30 сут эксперимента показатели активности еще несколько снизились и мало отличались от контроля во всех вариантах, за исключением варианта с 5%-ной дозировкой мелкого угля, где активность фосфатазы заметно увеличилась и соответствовала уровню начала эксперимента.

В вегетационном опыте с ячменем в агроземе альфегумусовом содержание подвижного фосфо-

ра в вариантах с биоуглем возрастало на 8–12% по сравнению с контролем, различия статистически достоверны лишь в вариантах с 5% дозировкой угля (рис. 2). При совместном применении биоугля и удобрения содержание P_2O_5 во всех вариантах больше, чем в вариантах с углем. Между собой варианты различаются незначительно, достоверное увеличение содержания подвижного фосфора на 29% отмечено лишь в варианте с мелким углем в 5%-ной дозировке с АЗФК. В агроземе текстурно-дифференцированном содержание P_2O_5 увеличивалось незначительно на 2–5% практически во всех вариантах, за исключением совместного применения мелкого биоугля и удобрения, где прирост составляет 11–14% и статистически достоверен. Согласно двухфакторному дисперси-

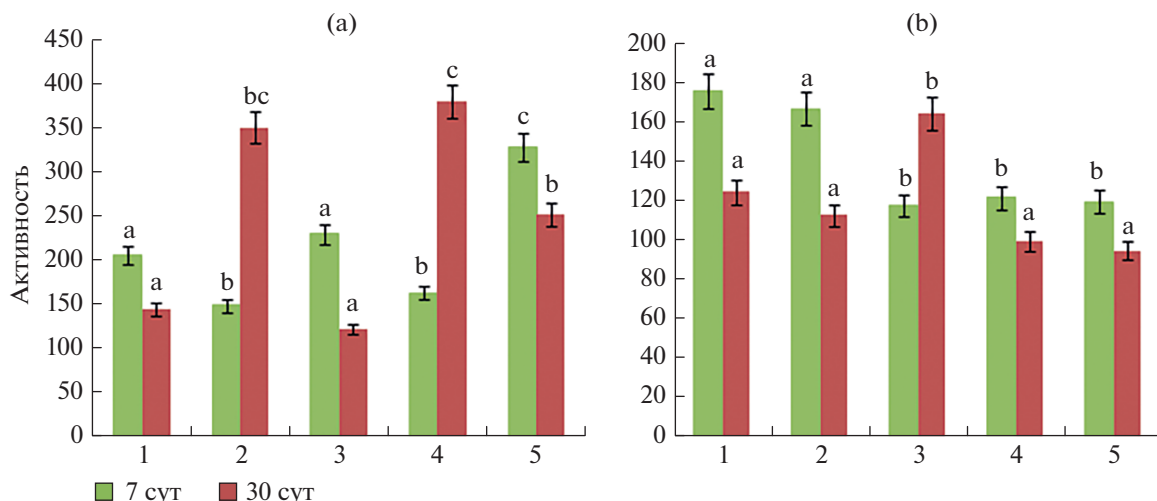


Рис. 1. Активность фосфатазы (мг P₂O₅/кг почвы за 2 ч) в опыте 2: а – агрозем альфегумусовый; б – агрозем текстурно-дифференцированный. Варианты: 1 – контроль; 2 – БУ ≤ 2 мм 2%; 3 – БУ ≤ 2 мм 5%; 4 – БУ 3–5 мм 2%; 5 – БУ 3–5 мм 5%.

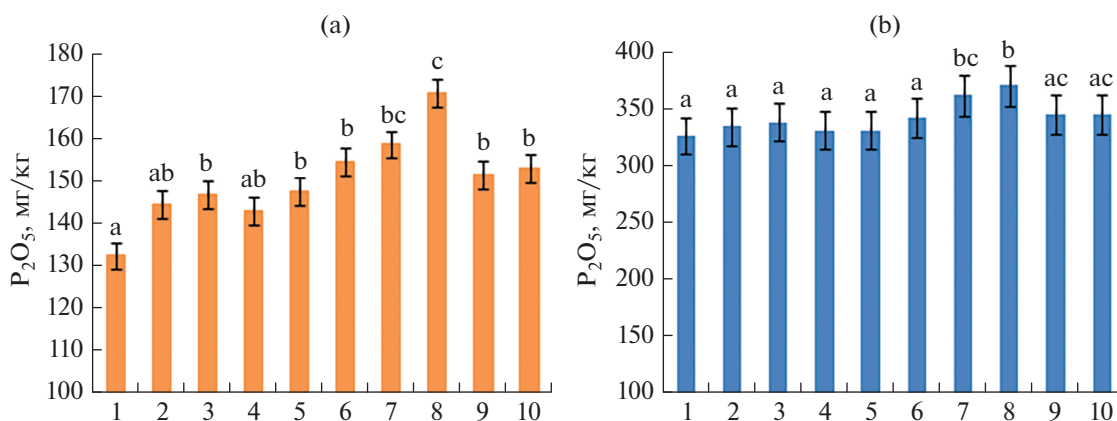


Рис. 2. Содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) в опыте 3: а – агрозем альфегумусовый; б – агрозем текстурно-дифференцированный. Варианты: 1 – контроль; 2 – БУ ≤ 2 мм 2%; 3 – БУ ≤ 2 мм 5%; 4 – БУ 3–5 мм 2%; 5 – БУ 3–5 мм 5%; 6 – АЗФК; 7 – БУ ≤ 2 мм 2% + АЗФК; 8 – БУ ≤ 2 мм 5% + АЗФК; 9 – БУ 3–5 мм 2% + АЗФК; 10 – БУ 3–5 мм 5% + АЗФК.

онному анализу (табл. 3), в обеих почвах с высоким уровнем статистической достоверности при низком уровне случайных отклонений биоуголь и удобрение оказывают влияние на уровень содержания подвижного фосфора. В целом по опыту доля влияния удобрения примерно в 2 раза больше, чем биоугля, при этом в агроземе альфегумусовом отмечено достоверное взаимное влияние факторов биоугля и удобрения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые почвы можно охарактеризовать как средние и хорошо обеспеченные фосфором, при этом агрозем текстурно-дифференцированный содержит примерно в 2 раза больше подвиж-

ного и валового фосфора по сравнению с агроземом альфегумусовым, что обусловлено его минералогическим и гранулометрическим составом. В результате применения биоугля в опыте 1 произошло достоверное увеличение рН во всех вариантах независимо от типа почвы, фракции и дозировки угля. Биоуголь повышает рН среды и снижает кислотность почвы, поскольку имеет высокую обменную емкость, щелочную реакцию и содержит значительное количество обменных катионов (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺). Данный эффект описан рядом авторов [1, 19, 30] и наиболее проявлен на кислых почвах. Как известно, активность ионов, способных к осаждению фосфора, зависит от реакции среды. По мере повышения

Таблица 3. Данные двухфакторного дисперсионного анализа (опыт 3)

Фактор	Агрозем альфегумусовый	Агрозем текстурно-дифференцированный
	доля влияния фактора, %/уровень значимости <i>p</i>	
БУ	23.5/<0.001	27.8/<0.001
АЗФК	49.5/<0.001	50.8/<0.001
Взаимодействие	12.5/0.01	7.5/0.06
Случайные отклонения	14.5	13.9

pH почвы анионы OH^- могут замещать PO_4^{4-} из аморфных фосфатов железа и алюминия, переводя их в растворимую форму. Максимальная концентрация фосфат-ионов в почвенном растворе наблюдается при pH почвенного раствора 5.4–6.0 [10]. Закономерным следствием является увеличение доступности фосфатов при применении биоугля в кислых почвах [20, 26]. В опыте 1 содержание подвижного P_2O_5 увеличивается значительно, особенно в агроземе альфегумусовом, где также отмечено заметное увеличение pH среды. В предыдущей работе [1] показано, что катионы Ca^{2+} , содержащиеся в биоугле, насыщают почвенно-поглощающий комплекс почв, что наиболее заметно в агроземе альфегумусовом, изначально ненасыщенном основаниями. При этом использование биоугля не ведет к увеличению валового фосфора в исследованных почвах, поскольку валовое содержание фосфора в древесном биоугле невелико. Данную закономерность отмечали и другие исследователи, считая, что увеличение размера пула доступного P в почве при добавлении биоугля связано с активацией эндогенного фосфора, а не с высвобождением фосфатов из угля [39].

Около 75% минерального фосфора в исследованных почвах представлено фракцией фосфатов алюминия, на фосфаты железа приходится 16%, на рыхлосвязанные фосфаты и Са-фосфаты приходится всего 9%, данное соотношение характерно для кислых таежных почв [10]. Как показывают исследования, биоуголь оказывает разнонаправленное влияние на неорганические соединения почвенных фосфатов. Биоуголь может как повышать содержание фосфора, связанного с кальцием [36], так и не влиять на него, напротив увеличивая фракцию Al-фосфатов [37]. Данные опыта 1 показывают, что влияние биоугля на фракционный состав минеральных фосфатов в основном проявилось в увеличении фракций рыхлосвязанных фосфатов и Са-фосфатов, сдвиг особенно заметен при 5%-ной дозировке угля и в агроземе альфегумусовом. Зависимость содержания доступных фосфатов, рыхлосвязанных фосфатов и фосфатов, связанных с кальцием от уровня pH почвы, характеризуется линейным приближением с коэффициентами детермина-

ции (R^2) в пределах 0.51–0.85 (рис. 3). Величина коэффициента корреляции (r) между pH почвы и представленными фракциями фосфатов >0.7, что характеризует силу связи между переменными как высокую. Следовательно, фактор кислотности почвы описывает более 50% дисперсии исследованных фракций фосфатов. Добавление биоугля увеличивает индуцированную кальцием адсорбцию фосфора, что аналогично эффекту известкования, когда происходит увеличение доступного P_2O_5 и изменение соотношения фракций минерального фосфора в сторону Са-фосфатов и рыхлосвязанных фосфатов [6, 9, 12].

Активность биохимических процессов мобилизации органического фосфора почвы характеризуется фосфогидролитическими ферментами. Фосфатаза является одним из ферментов, катализирующих гидролиз разнообразных фосфорорганических соединений почвы, переводя их в доступное для растений состояние. Исследования, касающиеся влияния биоугля на почвенную фосфатазу немногочисленны, но большинство из них показывают, что биоуголь оказывает положительное влияние на активность ферментов [24, 39]. Известно, что благодаря пористой структуре, способности адсорбировать органические вещества и снижать кислотность, применение биоугля обеспечивает благоприятную среду обитания для микроорганизмов и увеличивает микробную популяцию почв [23, 28]. В опыте 2 зафиксировано увеличение активности фосфатазы в агроземе альфегумусовом, при этом повышенная 5% дозировка биоугля оказывает быстрый эффект на 7 сут эксперимента. Через месяц большая активность отмечена в вариантах с 2% дозировкой и в вариантах с крупной фракцией, поскольку агрегаты биоугля могут увеличивать удельную площадь поверхности и усиливать адсорбцию фосфатазы в почвах [22]. Иногда добавление биоугля может негативно влиять на активность почвенной фосфатазы или не иметь существенного эффекта, как в опыте с агроземом текстурно-дифференцированным. Подавление микробиологической активности может быть связано с тяжелым гранулометрическим составом почв либо их нейтральной реакцией [40, 41]. Замечено, что высокая обеспеченность почвы подвижным фосфором, необхо-

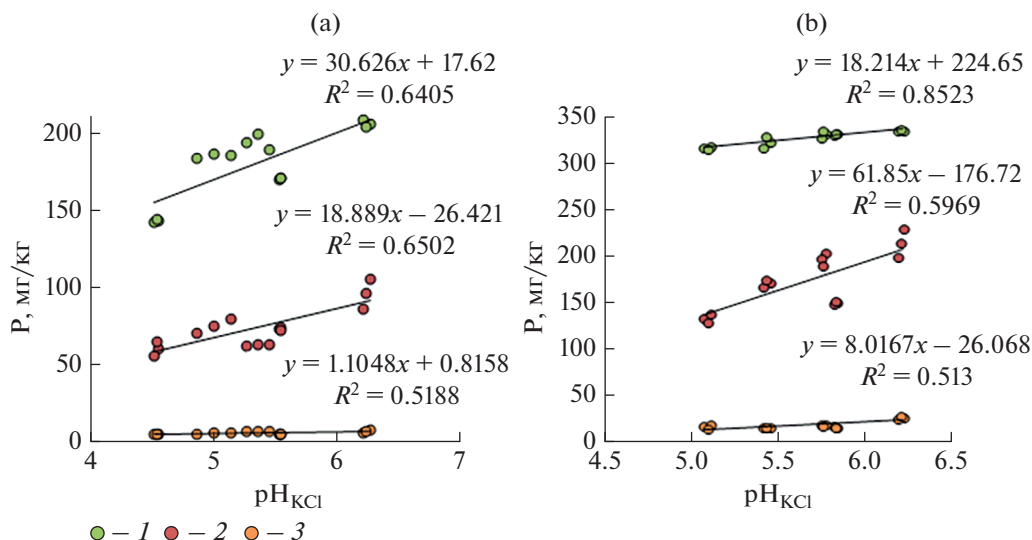


Рис. 3. Зависимость содержания фосфатов от уровня pH в вариантах опыта 1. а – агрозем альфегумусовый; б – агрозем текстурно-дифференцированный: 1 – подвижный фосфор P_2O_5 (по Кирсанову); 2 – Ca-фосфаты; 3 – рыхлосвязанные фосфаты.

димым для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, приводит к снижению фосфатазной активности [3]. Исследования генов *phoD* регулирующих синтез фосфатазы у бактерий показали, что их экспрессия тесно взаимосвязана с содержанием подвижного фосфора и возрастает в почвах с более низким содержанием P_2O_5 . Если подвижного фосфора в почве достаточно (как в случае с агроземом текстурно-дифференцированным), то экспрессия генов *phoD* ограничена [35].

Для повышения продуктивности почв и увеличения урожайности культур широко изучается применение как непосредственно биоугля, так и его совместное использование с удобрениями [16, 27]. Из-за высокой стоимости и дефицита фосфорных удобрений данные исследования особенно актуальны в отношении фосфатов. Не все биоугли сами по себе имеют значительную удобрительную ценность, так, уголь из лигноцеллюлозного сырья характеризуется высокой ароматичностью и содержит небольшое количество зольных элементов. Древесный уголь используется в основном в составе различных компостов, либо совместно с минеральными удобрениями [33]. Определение подвижного фосфора в вегетационном опыте с агроземом альфегумусовым выявило, что более высокое содержание P_2O_5 по сравнению с контролем имели варианты как с биоуглем ≤ 2 мм, так и с удобрением. Однако наибольший эффект оказывало совместное применение биоугля с удобрением. В агроземе текстурно-дифференцированном достоверное влияние оказывает лишь сочетание биоугля мелкой фракции и АЗФК. Похожий синергетический эффект биоугля и удобрения на содержание подвижного фосфора наблюдал ряд

авторов [29, 31]. В обзоре [16] отмечается, что наибольший прирост урожайности различных культур наблюдался, когда биоуголь применялся одновременно с неорганическими и органическими удобрениями. В опыте 3 двухфакторный дисперсионный анализ показал, что доля влияния АЗФК в целом по опыту выше, чем биоугля, но биоуголь оказывает дополнительное влияние на содержание подвижного фосфора. Данный эффект достигается благодаря мобилизации фосфатов за счет изменения pH среды и усиления микробиологической активности [2, 28, 36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В серии модельных экспериментов выявили, что наиболее заметный эффект практически на все исследованные показатели оказывала мелкая фракция биоугля в 5%-ной дозировке. Применение биоугля не оказывало статистически значимого влияния на увеличение содержания валового фосфора в обеих почвах, поскольку содержание P в биоугле незначительно. При этом использование биоугля приводило к статистически значимому увеличению значений pH_{KCl} по сравнению с контролем во всех вариантах агрозема альфегумусового и агрозема текстурно-дифференцированного. Фактор сдвига кислотности определял изменения в составе доступных фосфатов, рыхлосвязанных фосфатов и фосфатов, связанных с кальцием. В агроземе альфегумусовом биоуголь достоверно повышал содержание подвижного фосфора на 20–40%, а также усиливал активность фосфатазы. В агроземе текстурно-дифференцированном биоуголь незначительно увеличивал

содержание подвижного фосфора на 2–6%, и не оказывал существенного влияния на активность фосфатазы. Выявлено, что в вегетационном опыте доля влияния удобрения на содержание подвижного фосфора в 2 раза больше, чем биоугля, но биоуголь оказывал дополнительное воздействие благодаря мобилизации фосфатов за счет изменения рН среды и усиления микробиологической активности. В целом биоуголь оказывал более заметный эффект на фосфатный режим почвы легкого гранулометрического состава, которая характеризуется низкими значениями рН и меньшим содержанием подвижного и валового фосфора.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены в рамках госзадания КарНЦ РАН № FMEN-2022-0012 на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ “Карельский научный центр РАН”. Автор выражает благодарность Т.В. Богдановой за помощь в проведении аналитических работ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубровина И.А. Динамика физико-химических свойств дерново-подзолистых почв при внесении биоугля // Проблемы агрохимии и экологии. 2019. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.26178/AE.2019.51.56.004>
2. Дубровина И.А., Юркевич М.Г., Сидорова В.А. Влияние биоугля и удобрений на развитие растений ячменя и агрохимические показатели дерново-подзолистых почв в вегетационном опыте // Тр. КарНЦ РАН. 2020. № 3. С. 31–44. <https://doi.org/10.17076/eb1087>
3. Каширская Н.Н., Плеханова Л.Н., Чернышева Е.В., Ельцов М.В., Удальцов С.Н., Борисов А.В. Пространственно-временные особенности фосфатазной активности естественных и антропогенно-преобразованных почв // Почвоведение. 2020. № 1. С. 89–101. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20010098>
4. Кирпичников Н.А. Влияние извести на фосфатный режим слабоокультуренной дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2016. № 12. С. 3–8.
5. Кудярова А.Ю. Хемосорбция фосфат-ионов и деградация органо-минеральных сорбентов в кислых почвах // Почвоведение. 2010. № 6. С. 681–697.
6. Лыскова И.В., Рылова О.Н., Веселкова Н.А., Лыскова Т.В. Влияние удобрений и извести на агрохимические показатели и фосфатный режим дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 2(45). С. 27–31. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2015.45.2.27-32>
7. Минеев В.Г., Коваленко А.А., Ваулин А.В., Афанасьев Р.А. Влияние фосфорных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2009. № 10. С. 3–10.
8. Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы при длительном применении органических и минеральных удобрений // Агрохимия. 2014. № 9. С. 13–19.
9. Михайлова Л.А., Дербенева Л.В. Влияние известкования на фосфатный режим дерново-подзолистых почв разной степени окультуренности // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2007. №10. С. 28–32.
10. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 400 с.
11. Потатуева Ю.А. Эколого-агрохимическая оценка фосфорных и фосфорсодержащих удобрений в длительных полевых опытах // Агрохимия. 2013. № 6. С. 83–94.
12. Самсонова Н.Е., Родченков С.Н. Использование удобрений с пониженной растворимостью фосфатного компонента и фосфатное состояние дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 9. С. 24–31.
13. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
14. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 254 с.
15. Шафран С.А., Кирпичников Н.А. Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // Агрохимия. 2019. № 4. С. 3–10. <https://doi.org/10.1134/S0002188119040112>
16. Bai S.H., Omidvar N., Gallart M., Kämper W., Tahmasbian I., Farrar M.B., Singh K., Zhou G., Muqadass B., Xu C.-Y., Koech R., Li Y., Nguyen T.T.N., van Zwieten L. Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis // Sci. Total Environ. 2022. V. 808. 152073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152073>
17. Bornø M.L., Müller-Stöver D.S., Liu F. Contrasting effects of biochar on phosphorus dynamics and bioavailability in different soil types // Sci. Total Environ. 2018. V. 627. P. 963–974. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.283>
18. Chen M., Alim N., Zhang Y., Xu N., Cao X. Contrasting effects of biochar nanoparticles on the retention and transport of phosphorus in acidic and alkaline soils // Environ. Poll. 2018. V. 239. P. 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.050>
19. Dai Z., Zhang X., Tang C., Muhammad N., Wu J., Brookes P. C., Xu J. Potential role of biochars in decreasing soil acidification – A critical review // Sci. Total Environ. 2017. V. 581–582. P. 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>

20. *Dume B., Tessema D.A., Regassa A., Berecha G.* Effects of biochar on phosphorus sorption and desorption in acidic and calcareous soils // *Civil Environ Res.* 2017. V. 9(5). P. 10–20.
21. *Eduah J.O., Nartey E.K., Abekoe M.K., Breuning-Madsen H., Andersen M.N.* Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures // *Geoderma.* 2019. V. 341. P. 10–17.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.016>
22. *Gao S., DeLuca T.H.* Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands // *Soil Biol. Biochem.* 2018. V. 126. P. 144–150.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.002>
23. *Gao S., DeLuca T.H., Cleveland C.C.* Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: a meta-analysis // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 654. P. 463–472.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.124>
24. *Ghodsad L., Reyhanitabar A., Maghsoodi M.R., Lajayer B.A., Chang S.X.* Biochar affects the fate of phosphorus in soil and water: A critical review // *Chemosphere.* 2021. V. 283. P. 131176.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131176>
25. *Ghodsad L., Reyhanitabar A., Oustan S., Alidokht L.* Phosphorus sorption and desorption characteristics of soils as affected by biochar // *Soil Till. Res.* 2022. V. 216. P. 105251.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105251>
26. *Glaser B., Lehr V.-I.* Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: a meta-analysis // *Scientific Rep.* 2019. V. 9. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
27. *He L., Zhong Z., Yang H.* Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers // *J. Integrative Agriculture.* 2017. V. 16(3). P. 704–712.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61420-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61420-X)
28. *Liu S., Meng J., Jiang L., Yang X., Lan Y., Cheng X., Chen W.* Rice husk biochar impacts soil phosphorus availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types // *Appl. Soil Ecology.* 2017. V. 116. P. 12–22.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.020>
29. *Oladele S.O., Adeyemo A.J., Awodun M.A.* Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rainN-fed rice yield in two contrasting soils // *Geoderma.* 2019. V. 336. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.025>
30. *Raboin L.-M., Razafimahafaly A.H.D., Rabenjarisoa 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 Crops Res.* 2016. V. 199. P. 99–108.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.005>
31. *Rafael R.B.A., Fernández-Marcos M.L., Cocco S., Ruello M.L., Fornasier F., Corti G.* Increased phosphorus availability to corn resulting from the simultaneous applications of phosphate rock, calcareous rock, and biochar to an acid sandy soil // *Pedosphere.* 2020. V. 30(6). P. 719–733.
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60034-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60034-0)
32. *Sachdeva V., Hussain N., Husk B.R., Whalen J.K.* Biochar-induced soil stability influences phosphorus retention in a temperate agricultural soil // *Geoderma.* 2019. V. 351. P. 71–75.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.029>
33. *Tammeorg P., Simojoki A., Mäkelä P., Stoddard F.L., Alakukku L., Helenius J.* Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertilizer on a boreal loamy sand // *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2014. V. 191. P. 108–116.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.007>
34. *Wang T., Camps-Arbestain M., Hedley M., Bishop P.* Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars // *Plant Soil.* 2012. V. 357. P. 173–187.
<https://doi.org/10.1007/s11104-012-1131-9>
35. *Wei X., Hu Y., Razavi B.S., Zhou J., Shen J., Nannipieri P., Wu J., Ge T.* Rare taxa of alkaline phosphomonoesterase-harboring microorganisms mediate soil phosphorus mineralization // *Soil Biol. Biochem.* 2019. V. 131. P. 62–70.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.12.025>
36. *Xu G., Sun J., Shao H., Chang S.X.* Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity // *Ecological Engineering.* 2014. V. 62. P. 54–60.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.027>
37. *Yang C., Lu S.* Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 805. P. 150325.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150325>
38. *Yang F., Sui L., Tang C., Li J., Cheng K., Xue Q.* Sustainable advances on phosphorus utilization in soil via addition of biochar and humic substances // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 768. P. 145106.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145106>
39. *Yang L., Wu Y., Wang Y., An W., Jin J., Sun K., Wang X.* Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 758. P. 143657.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143657>
40. *Zhai L., Caiji Z., Liu J., Wang H., Ren T., Gai X., Xi B., Liu H.* Short-term effects of maize residue biochar on phosphorus availability in two soils with different phosphorus sorption capacities // *Biol. Ferti. Soils.* 2015. V. 51. P. 113–122.
<https://doi.org/10.1007/s00374-014-0954-3>
41. *Zhang M., Cheng G., Feng H., Sun B., Zhao Y., Chen H., Chen J., Dyck M., Wang X., Zhang J., Zhang A.* Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China // *Environ. Sci. Poll. Res.* 2017. V. 24. P. 10108–10120.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-8505-8>

Changing the Phosphate Regime of Soils in the Middle Taiga When Using Biochar

I. A. Dubrovina*

Institute of Biology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, 185910 Russia

**e-mail: vorgo@mail.ru*

The influence of wood biochar on the content of various forms of phosphates was studied in laboratory experiments on soils with different phosphorus availability. Soils of the middle taiga subzone of Karelia were used in this work: a sandy Umbric Podzol and a heavy loamy Umbric Retisol. The tests studied the effect of two fractions of biochar (3–5 and ≤ 2 mm) in an amount of 2% and 5% of soil mass on pH_{KCl} , the content of available and total phosphorus, the inorganic phosphorus fractions (Chang-Jackson method), and the total phosphatase activity of soils, as well as the effect of separate and combined application of biochar and fertilizer (NPK) on the content of available phosphorus in a pot experiment with spring barley. The research revealed that biochar significantly increased the content of available phosphorus by 20–40%, increased the content of the fraction of Ca-bounded P, Al-bounded P and loosely-bounded P, and also increased the phosphatase activity in the Umbric Podzol. In pot experiment was noted a higher content of P_2O_5 in variants with biochar ≤ 2 mm, in variants with fertilizer, and a significant mutual influence factors of biochar and fertilizer. Biochar increased the content of available phosphorus by 2–6%, increased the content of Ca-bounded P and loosely-bounded P (with biochar ≤ 2 mm at 5% dosage), and had no significant effect on the phosphatase activity in the Umbric Retisol. Only combination of biochar ≤ 2 mm and fertilizer had a significant effect in pot experiment with Umbric Retisol. In general, the most noticeable effect on almost all studied indicators was provided by ≤ 2 mm fraction of biochar in a 5% dosage. The use of biochar led to statistically significant increase in pH_{KCl} values, and did not affect the content of total phosphorus in both soils. Biochar had a greater effect on the phosphate regime of coarse-textured soil with an initially lower pH and a less content of available and total phosphorus.

Keywords: biochar, available and total phosphorus, inorganic phosphorus fractions, phosphatase, model experiment, Umbric Podzol, Umbric Retisol