

Разработка и оптимизация активированного угля из биомассы для повышения водосбережения в сельском хозяйстве

Ерлан Досжанов^{1,2}, Дана Ахметжанова^{1,2*}, Арман Жумажанов^{1,2}, Оспан Досжанов³, Зере Нұрбол⁴, Мағжан Оспан⁵

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; doszhanov_yerlan@mail.ru, adana128128@gmail.com, jumajanarman@gmail.com

²Институт проблем горения, Алматы, Казахстан; doszhanov_yerlan@mail.ru, adana128128@gmail.com, jumajanarman@gmail.com

³Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; ospan.doszhanov@mail.ru

⁴Назарбаев Интеллектуальная школа естественно-математического направления, Алматы, Казахстан; zere2301nm@gmail.com

⁵Joо High School, Алматы, Казахстан; ospanmagzhan9@gmail.com

*Корреспонденция: adana128128@gmail.com

Цитирование: Досжанов, Е., Ахметжанова, Д., Жумажанов, А., Досжанов, О., Нұрбол, З., Оспан, М. (2026). Разработка и оптимизация активированного угля из биомассы для повышения водосбережения в сельском хозяйстве. Journal of Ecology and Sustainability, 154(1), 77-92. <https://doi.org/10.32523/5da1jn33>

Академический редактор:
А. Зандыбай

Поступила: 13.12.2025
Исправлена: 12.02.2026
Принята: 27.03.2026
Опубликована: 31.03.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Аннотация. Устойчивое развитие сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата и ограниченных водных ресурсов требует внедрения инновационных материалов с повышенной влагоудерживающей способностью, включая углеродные субстраты на основе сельскохозяйственных отходов. В данной работе проведено комплексное исследование текстурных, морфологических и адсорбционных характеристик активированного угля (АУ), синтезированного из рисовой шелухи при варьировании массовых соотношений сорбента к гидроксиду калия (КОН) (1:1, 1:2, 1:3 и 1:4). Цель работы – оптимизация условий химической активации для формирования пористой структуры, обеспечивающей эффективное влагоудержание. Методология включала применение теории функционала плотности (DFT) и метода Барретта–Джойнера–Халенды (ВЖН). Результаты показали, что максимальный суммарный объем пор (1,6 см³/г) и развитая удельная поверхность (2900 м²/г) достигаются при соотношении 1:3. ИК-Фурье спектроскопия подтвердила наличие гидрофильных функциональных групп (О-Н, С=О, С-О), играющих ключевую роль в связывании молекул воды. Эксперименты по влагоудержанию, выполненные в трехкратной повторности (n=3), продемонстрировали, что образец 1:3 характеризуется наиболее стабильным сохранением влаги как при 22 °С, так и при повышенной температуре 50 °С, значительно превосходя образцы с низкой степенью активации (1:1, 1:2) и переактивированный образец (1:4). Сравнительный анализ показал, что оптимизированный АУ обладает превосходством над традиционным биоуглем и цеолитами по удельной поверхности, обеспечивая долгосрочную стабильность углеродного каркаса в почве. Полученные данные подтверждают ключевую роль баланса микро- и мезопор в процессах замедления испарения воды и свидетельствуют о высокой перспективности

использования данных материалов в качестве экологически безопасных влагосберегающих агентов для повышения продуктивности агроценозов в засушливых регионах.

Ключевые слова: активированный уголь; сельскохозяйственные отходы; влагоудерживающий субстрат; пористая структура; адсорбционные свойства.

1. Введение

Обеспечение устойчивого земледелия в условиях климатических изменений и дефицита воды - приоритетная задача мирового агропромышленного комплекса (Lesk et al., 2016, Ayaz et al., 2021). Изменение климата напрямую снижает продуктивность сельскохозяйственных культур, что особенно критично для регионов с ограниченными водными ресурсами. Согласно Седьмому национальному докладу Республики Казахстан об изменении климата, к 2050 году влажность в вегетационный период в Северо-Казахстанской области снизится на 11–16%, а частота засух возрастет на 10–15% (Zhumagulov et al., 2024). Эти прогнозы свидетельствуют о том, что традиционные методы ведения сельского хозяйства требуют пересмотра в пользу водосберегающих технологий.

В последние десятилетия северные широты прогреваются быстрее других регионов планеты. В Центральной Азии это сопровождается дефицитом осадков и увеличением продолжительности засух (Abdolla et al., 2024). В Казахстане более 80% сельхозугодий подвержены дефициту влаги. В этой связи внедрение водосберегающих технологий становится ключевым фактором продовольственной безопасности страны.

Традиционное использование минеральных удобрений для повышения урожайности часто ведет к значительным экологическим проблемам. Выщелачивание азота способствует загрязнению водных ресурсов и почвы, а также увеличивает подвижность тяжелых металлов (Sabitov et al., 2024, Brar et al., 2024, Doszhanov et al., 2024, Akhmetzhanova et al., 2025). Перспективным решением являются сорбенты, способные удерживать влагу и питательные вещества, снижая потребность в частом поливе.

Наиболее доступным и экономически оправданным сырьем для производства подобных сорбентов являются растительные остатки: стебли, шелуха и кора. Из этого растительного материала получают активированный уголь (АУ), обладающий высокой удельной поверхностью и развитой пористой структурой (Ndede et al., 2022, Sabitov et al., 2024). Важно учитывать, что различия между АУ и биоуглем заключаются в источнике сырья, методе производства и целевом применении (Hagemann et al., 2018). Процесс получения АУ включает несколько стадий: карбонизацию биомассы в условиях ограниченного доступа кислорода и последующую химическую активацию с использованием гидроксида калия (KOH) (Williams et al., 2022). В результате образуется биоуголь - углеродсодержащий продукт, который может сохранять питательные вещества, связывать тяжелые металлы и снижать токсичность удобрений (Chen et al., 2018, Afshar et al., 2024, Abhishek et al., 2022). Биоуголь может применяться в различных областях сельского хозяйства. Он может использоваться как почвенная добавка для улучшения водного и питательного баланса почвы, добавляться в корма и силос, служить субстратом в рыбном хозяйстве, а также использоваться для очистки воды (Saletnik et al., 2019, Feng et al., 2023, Moroung et al., 2020, Dadhich et al., 2022, Schmidt et al., 2019, Maleki et al., 2023). В настоящей работе материал получен путем химической активации рисовой шелухи с использованием KOH и классифицируется как АУ. При этом параметры активации, включая массовое соотношение KOH и углеродного сырья, оказывают существенное влияние на текстурные и адсорбционные характеристики полученного углерода. Эти параметры определяют способность материала удерживать влагу и поглощать питательные вещества, что напрямую влияет на его эффективность при использовании в сельском хозяйстве (Jedynak et al., 2024, Hiremath et al., 2012, Doszhanov et al., 2023).

В данной работе проведено комплексное изучение поверхностных и структурных характеристик АУ, полученного при различных массовых соотношениях сорбента и КОН. Цель исследования - оптимизация условий активации для повышения удельной поверхности и пористой структуры материала, что позволяет его использовать в качестве эффективного водосберегающего субстрата. Для идентификации функциональных групп, отвечающих за удержание воды, использовался метод инфракрасной (ИК) Фурье-спектроскопии (FTIR). Пористая структура анализировалась методами теории функционала плотности (DFT) и Барретта-Джойнера-Халенды (БДХ). Это обеспечило детальное понимание влияния условий активации на формирование микро- и мезопор (Doszhanov et al., 2023, Bardestani et al., 2019, McLaren et al., 2021, Barrett et al., 1951).

Результаты позволяют оценить структурные и адсорбционные свойства АУ и выявить оптимальные параметры производства угля с высокой влагоудерживающей способностью. Это имеет прямое значение для внедрения водосберегающих технологий в сельское хозяйство. Полученные данные способствуют пониманию механизмов действия сорбентов и открывают новые подходы к управлению водными ресурсами в условиях меняющегося климата.

2. Материалы и методы

В рамках настоящей работы под влагоёмкостью понимается количество воды, поглощаемой материалом при заданных экспериментальных условиях, тогда как влагоудерживающая способность используется для описания способности материала сохранять влагу во времени и при высыхании, что имеет прикладное значение для сельскохозяйственных субстратов.

АУ был получен из рисовой шелухи – побочного продукта переработки риса, являющегося высокоуглеродным сырьем благодаря значительному содержанию целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Эти компоненты обеспечивают формирование развитой пористой структуры при термохимической обработке.

Процесс получения АУ включал пять этапов: тщательное измельчение сырья, карбонизация, пропитка щелочью, предварительный нагрев и химическая активация. Рисовую шелуху измельчали до мелких фракций с целью увеличения удельной поверхности и обеспечения равномерной теплопередачи во время пиролиза. Такая подготовка повышала эффективность карбонизации, уменьшала неоднородность структуры материала и способствовала формированию пористой структуры с развитой микропористостью.

Карбонизация проводилась при температуре 550 °С в течение 120 мин с линейной скоростью нагрева 5 °С/мин. Эксперимент выполняли в инертной атмосфере, поддерживаемой подачей азота в вертикальный стальной реактор со скоростью 150 см³/мин, что обеспечивало предотвращение окислительных процессов и стабильность структуры углерода.

Карбонизированные образцы подвергались пропитке 1 М раствором КОН с различными массовыми соотношениями сорбента к щелочи 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4 (соответствующие объемы раствора 5, 10, 15 и 20 мл). Это позволяло равномерно распределить активирующий агент по всей массе материала. Для глубокого проникновения щелочи смесь выдерживали 3 часа при температуре 30–80 °С.

Образцы нагревали в электропечи до 300–850 °С (5 °С/мин). После 3-часовой выдержки материал охлаждали до комнатной температуры в среде аргона. Для удаления остаточных реагентов и продуктов реакции полученный АУ промывали 0,1 М раствором соляной кислоты, а затем дистиллированной водой до достижения нейтрального рН (6–7). После промывки образцы сушили при температуре 100–105 °С до постоянной массы.

Для тестов использовались частицы размером 1–2 мм. Испытания проводились для всех четырех типов образцов (соотношения от 1:1 до 1:4). Для каждого образца использовали по 10 г материала с добавлением 5 г дистиллированной воды. Испытания проводились при температурах – 22 °С и 50 °С. Динамику поглощения и испарения влаги фиксировали через 10, 20, 30, 60, 120 и 150 мин.

Исследования влагоемкости и влагоудерживающей способности проводились в идентичных условиях в трехкратной повторности ($n=3$) для каждого образца. Полученные результаты носят сравнительный характер и позволяют выявить различия в свойствах материалов в зависимости от условий их активации. Статистическая обработка данных включала расчет стандартного отклонения (SD), результаты представлены в формате Среднее \pm SD.

3. Результаты

3.1. Морфологическая структура сорбентов

Морфологическая структура полученных АУ зависит от соотношения масс исходного сорбента и гидроксида калия (KOH): а) 1:1, б) 1:2, с) 1:3 и д) 1:4 (рисунок 1). Микрофотографии демонстрируют изменение пористости и структуры образцов при увеличении содержания АУ.

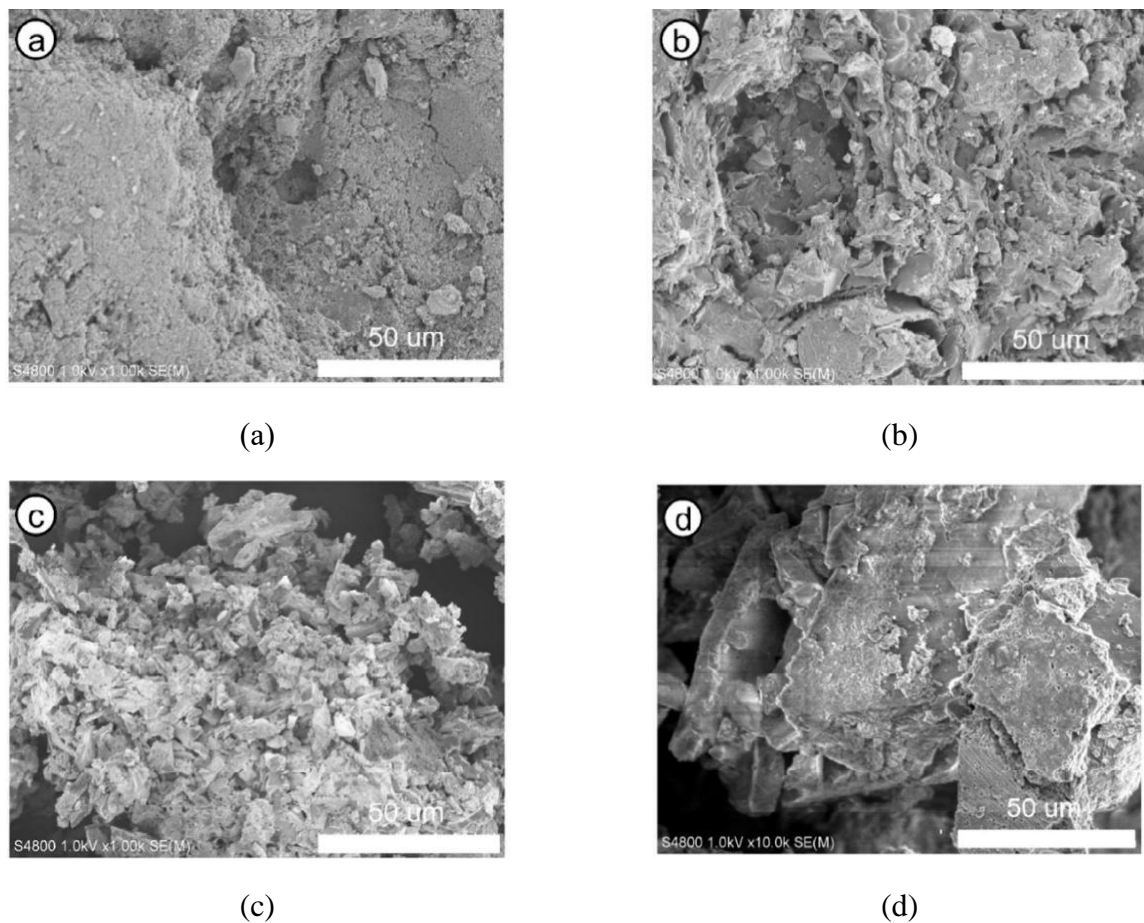


Рисунок 1. Микроструктура активированного угля, полученного при различных массовых соотношениях сорбента и KOH: (а) 1:1, (б) 1:2, (с) 1:3 и (д) 1:4

Образец, полученный при соотношении 1:1, характеризуется сравнительно плотной и слаборазвитой структурой с низкой степенью пористости (рисунок 1а). При увеличении соотношения до 1:2 наблюдается повышение рыхлости материала и увеличение количества пор по сравнению с образцом 1:1 (рисунок 1б). Структура становится неоднородной с появлением микропор.

Наиболее выраженная пористая структура зафиксирована в образце при соотношении 1:3 (рисунок 1с), который отличается равномерным распределением пор и высокой степенью разрыхления углеродной матрицы. При дальнейшем увеличении доли KOH до соотношения 1:4 структура становится чрезмерно рыхлой, с признаками поверхностной эрозии и разрушения углеродного каркаса (рисунок 1д).

3.2. Энергодисперсионные спектры (ЭДС) АУ

На рисунке 2 представлены энергодисперсионные спектры (ЭДС) АУ, полученного при различных массовых соотношениях сорбента к КОН. Во всех образцах зафиксированы пики, соответствующие основным элементам структуры АУ: углерод (С), кислород (О), а также натрий (Na), магний (Mg), алюминий (Al) и кремний (Si).

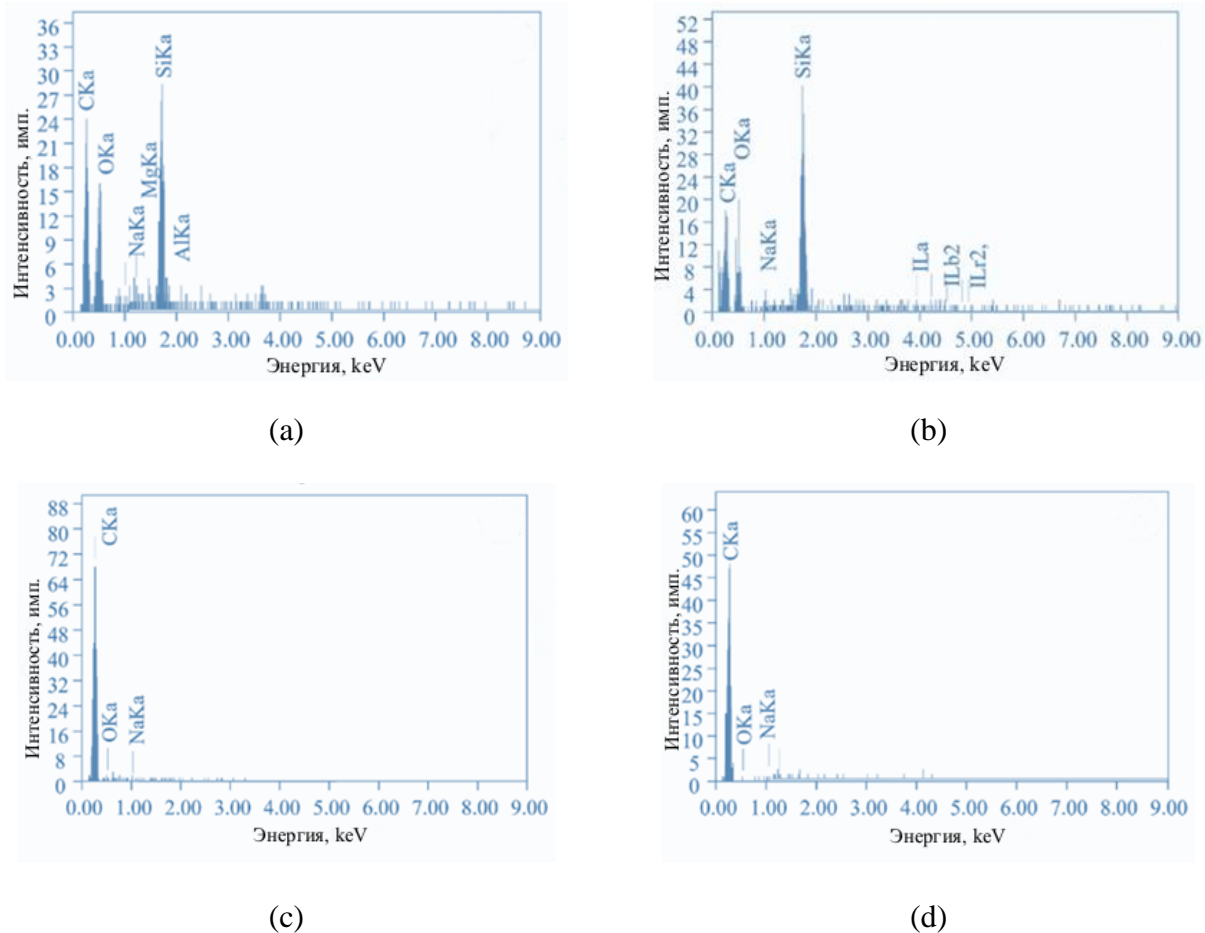


Рисунок 2. Энергодисперсионные спектры активированного угля, полученные при различных массовых соотношениях сорбента и КОН: (a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:3 и (d) 1:4

Образец 1:1 (рисунок 2a) наблюдаются выраженные пики С и О, а также пики Na и Mg.

Образец 1:2 (рисунок 2b): отмечается рост интенсивности пиков С и О. В спектре также фиксируется выраженный пик Si.

Образец 1:3 (рисунок 2c): в спектре доминируют пики С и О, в то время содержание примесей минимально.

Образец 1:4 (рисунок 2d): основными элементами также остаются С и О, однако интенсивность пиков Na и Mg несколько возрастает по сравнению с образцом 1:3.

Для оценки поверхностных характеристик АУ, синтезированных при различных соотношениях сорбента и КОН, проведены измерения параметров азотной адсорбции методом БЭТ. Результаты представлены в таблице 1.

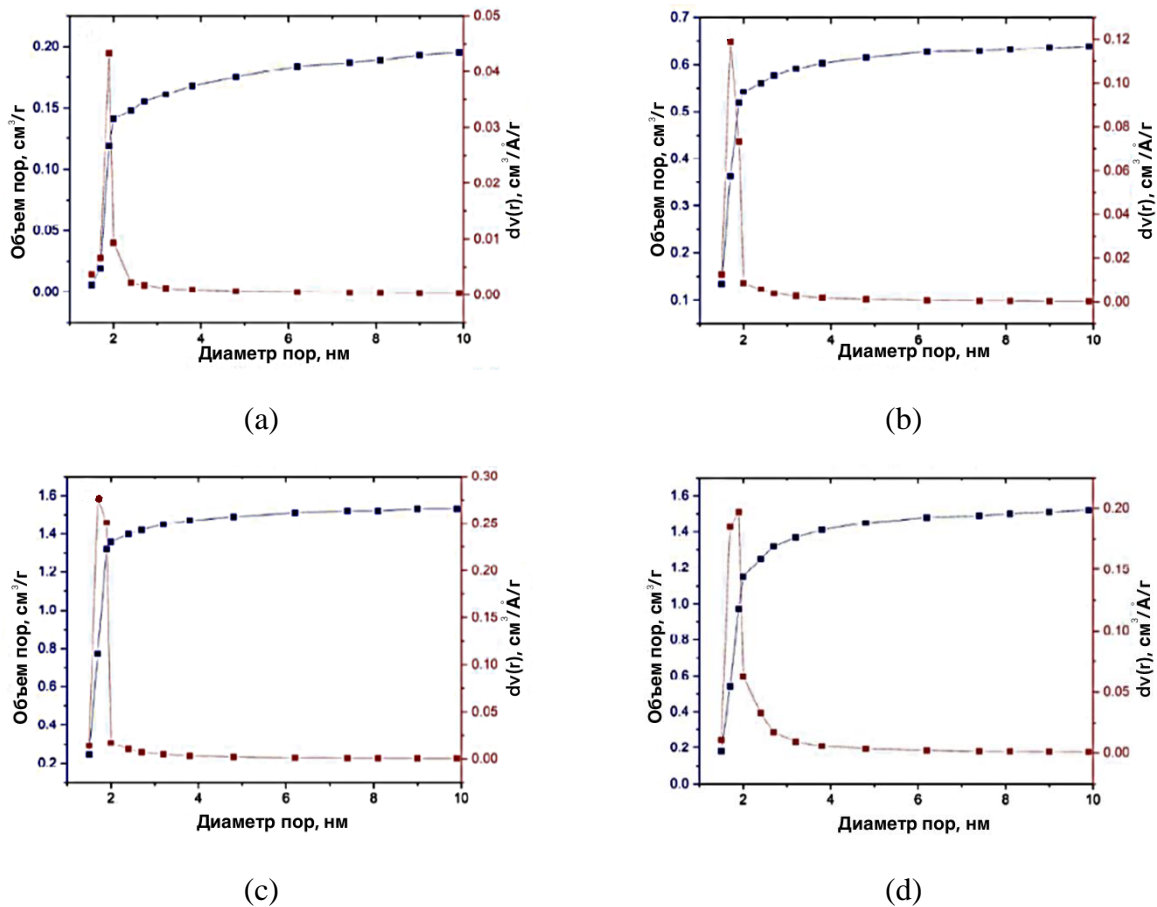
Таблица 1. Текстурные характеристики и параметры адсорбции БЭТ образцов при различных массовых соотношениях сорбента к КОН

Соотношение сорбент:КОН	Удельная поверхность, м ² /г	Константа, С	Коэффициент корреляции, r
1:1	910,0	55,456	0,999
1:2	1210,0	195,234	0,997
1:3	2900,0	101,356	0,997
1:4	924,0	57,389	0,952

Наибольшее значение удельной поверхности (2900,0 м²/г) зафиксировано для образца с соотношением 1:3. При дальнейшем увеличении содержания щелочи (до 1:4) наблюдается резкое снижение поверхности до 924,0 м²/г, что может быть связано с частичным разрушением пористой структуры.

3.3. Распределение объема пор АУ

Анализ распределения объема пор АУ, полученного при четырех массовых соотношениях сорбента к КОН, представлен на рисунке 3. Графики демонстрируют зависимость общего (см³/г) и дифференциального объемов пор $dv(r)$ (см³/Å/г) от их диаметра. Эти данные позволяют оценить влияние условий активации на формирование пористой структуры материала.

**Рисунок 3.** Распределение объема пор активированного угля при различных массовых соотношениях сорбента и КОН: (a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:3 и (d) 1:4

Образцу КОН = 1:1 характерен умеренный общий объём пор, где структура представлена преимущественно микропорами диаметром ≈ 2 нм (рисунок 3а). На графике $dv(r)$ наблюдается выраженный пик при данном диаметре, тогда как вклад мезо- и макропор незначителен.

В образце 1:2 общий объём пор возрастает до $0,7 \text{ см}^3/\text{г}$, при этом микропоры диаметром около 2 нм также остаются доминирующими (рисунок 3б).

Максимальный общий объём пор – $1,6 \text{ см}^3/\text{г}$ - зафиксирован в образце 1:3 (рисунок 3с). В данном случае наряду с высокой концентрацией микропор присутствует заметная доля мезопор, характеризующихся равномерным распределением

В образце 1:4 общий объём пор сохраняется на уровне $1,6 \text{ см}^3/\text{г}$, однако пик $dv(r)$ становится менее выраженным, что свидетельствует о перераспределении пор в сторону более крупных диаметров (рисунок 3д).

3.4. Влагоёмкость АУ

Экспериментальные исследования показали, что динамика удержания воды АУ существенно зависит от массового соотношения сорбента и КОН, используемого на стадии химической активации. Наиболее высокая влагоёмкость и замедленное испарение воды наблюдались у образца с соотношением 1:3, который характеризовался оптимально развитой микропористой структурой, обеспечивающей эффективное удержание влаги.

Анализ динамики испарения воды показал, что при повышенной температуре 50°C масса воды в образце 1:3 постепенно уменьшалась с $5,031 \text{ г}$ в начале эксперимента до $1,695 \text{ г}$ через 150 мин, что отражает стабильный и равномерный характер потери влаги. При комнатной температуре 22°C скорость испарения была значительно ниже, и масса воды через тот же временной интервал составляла $4,320 \text{ г}$, что свидетельствует о высокой влагоудерживающей способности материала в условиях, приближенных к естественным (Таблица 2).

Таблица 2. Динамика испарения воды (г) при температурах 50°C и 22°C

t, мин	1:1 (50°C)	1:1 (22°C)	1:2 (50°C)	1:2 (22°C)	1:3 (50°C)	1:3 (22°C)	1:4 (50°C)	1:4 (22°C)
0	$5,031 \pm 0,03$	$5,035 \pm 0,01$	$5,036 \pm 0,01$	$5,035 \pm 0,03$	$5,036 \pm 0,02$	$5,035 \pm 0,01$	$5,030 \pm 0,01$	$5,035 \pm 0,01$
10	$5,052 \pm 0,05$	$4,906 \pm 0,07$	$5,105 \pm 0,04$	$4,929 \pm 0,02$	$5,137 \pm 0,05$	$4,939 \pm 0,05$	$5,120 \pm 0,02$	$4,930 \pm 0,01$
30	$4,402 \pm 0,18$	$4,658 \pm 0,06$	$4,556 \pm 0,09$	$4,756 \pm 0,02$	$4,687 \pm 0,04$	$4,858 \pm 0,02$	$4,656 \pm 0,02$	$4,825 \pm 0,06$
60	$3,505 \pm 0,15$	$4,350 \pm 0,66$	$3,855 \pm 0,06$	$4,508 \pm 0,05$	$4,085 \pm 0,04$	$4,710 \pm 0,02$	$4,004 \pm 0,04$	$4,657 \pm 0,07$
120	$2,002 \pm 1,7$	$4,005 \pm 0,64$	$2,503 \pm 0,15$	$4,251 \pm 0,01$	$2,860 \pm 0,05$	$4,545 \pm 0,05$	$2,803 \pm 0,02$	$4,508 \pm 0,02$
150	$0,907 \pm 0,65$	$3,709 \pm 0,50$	$1,308 \pm 0,05$	$4,005 \pm 0,01$	$1,695 \pm 0,02$	$4,320 \pm 0,04$	$1,606 \pm 0,02$	$4,286 \pm 0,04$

Примечание: Данные представлены как среднее значение \pm стандартное отклонение SD для $n = 3$ повторностей

Образец с соотношением 1:4 продемонстрировал схожие тенденции, однако скорость испарения воды при 50°C была несколько выше по сравнению с образцом 1:3. Это может быть связано с изменением соотношения микро- и мезопор, при котором увеличение доли более крупных пор способствует ускоренному испарению воды при повышенной температуре, несмотря на достаточно высокую начальную влагоёмкость материала. При температуре 22°C различия между образцами 1:3 и 1:4 были менее выражены, что указывает на меньшую чувствительность их влагоудерживающих свойств к температурным колебаниям в умеренных условиях.

Образцы с соотношениями 1:2 и 1:1 характеризовались более быстрым снижением массы воды, особенно при температуре 50°C, что свидетельствует о меньшей способности удерживать влагу. Вероятной причиной является менее развитая пористая структура и ограниченная микропористость, вследствие чего вода быстрее испаряется и в меньшей степени задерживается в объёме углеродного материала. При температуре 22°C различия между этими образцами и наиболее эффективными образцами (1:3 и 1:4) сохранялись, однако проявлялись менее резко за счёт замедления процессов испарения. Таким образом, полученные результаты показывают, что массовое соотношение сорбента и КОН является ключевым фактором, определяющим как влагоёмкость, так и влагоудерживающую способность АУ. Наиболее эффективные образцы (1:3 и 1:4) сохраняют значительную часть воды в течение длительного времени, тогда как образцы с меньшей активацией (1:2 и 1:1) характеризуются ускоренной потерей влаги, особенно при повышенной температуре. Эти наблюдения подчеркивают важность контроля условий химической активации для формирования пористой структуры, обеспечивающей стабильные влагосберегающие свойства материала.

4. Обсуждение

4.1. Влияние массового соотношения КОН на морфологию и элементный состав

Низкая пористость образца 1:1, вероятно, обусловлена недостаточным количеством активирующего агента для эффективного протекания реакций химической активации. В этих условиях процессы взаимодействия КОН с углеродной матрицей ограничены, что приводит к сохранению крупных, слабоветвлённых структурных элементов. Присутствие Na и Mg в образце может быть связано с неполным удалением природных минеральных компонентов и низкой степенью активации на ранней стадии процесса.

Увеличение доли КОН до соотношения 1:2 приводит к интенсивному разрушению крупных фрагментов углеродного материала и формированию микропор. Это указывает на усиление реакций активации и развитие пористой сети в структуре АУ. Рост интенсивности пиков С и О указывает на усиление процессов химической активации и развитие пористой структуры. Высокое содержание Si в данном образце связано с наличием природного SiO₂, характерного для исходного сырья – рисовой шелухи, и его сохранением в процессе активации.

Оптимальные условия активации достигаются при соотношении 1:3, где достигается максимальная удельная поверхность и высокая степень чистоты (доминируют пики С и О). Это указывает на контролируемое травление матрицы без разрушения её каркаса.

При дальнейшем увеличении доли КОН до соотношения 1:4 наблюдается эффект переактивации. Избыток щёлочи приводит к чрезмерному травлению углеродной структуры, эрозии поверхности и частичному разрушению углеродного каркаса, что может негативно сказываться на механической стабильности и эксплуатационных свойствах материала. Таким образом, чрезмерные концентрации активирующего агента не являются целесообразными, несмотря на увеличение степени разрыхления структуры. Вторичный рост интенсивности пиков Na и Mg указывает на накопление щелочных остатков в структуре АУ. Это может быть связано с переактивацией и частичной деградацией углеродного каркаса, а также неполным удалением щёлочи при промывке.

Результаты БЭТ-анализа подтверждают, что увеличение доли КОН в целом способствует росту удельной поверхности АУ. Однако при избытке активирующего агента наблюдается снижение линейности изотерм адсорбции и уменьшение удельной поверхности, что связано с разрушением пористой структуры. Таким образом, массовое соотношение сорбента и КОН 1:3 является оптимальным для получения АУ с высокоразвитой поверхностью и стабильными структурными характеристиками.

4.2. Влияние условий активации на развитие микропористой структуры и объём пор

Доминирование микропор диаметром около 2 нм во всех образцах указывает на ключевую роль химической активации КОН в формировании микропористой структуры АУ. Относительно низкий объём пор при соотношении 1:1 свидетельствует о недостаточной интенсивности процессов активации, что ограничивает развитие пористой сети.

В образце 1:2 заметен рост общего объёма пор, что связано с более эффективным взаимодействием активирующего агента с углеродной матрицей и формированием дополнительных микропор.

Сочетание высокой концентрации микропор и присутствия мезопор в образце 1:3 обеспечивает увеличение доступной поверхности и потенциально более высокую адсорбционную ёмкость. Равномерное распределение пор и выраженный пик $dv(r)$ указывают на сбалансированный характер активации без разрушения углеродного каркаса.

В образце 1:4 наблюдается перераспределение пор в сторону более крупных размеров и снижение выраженности микропористости. Это может быть связано с переактивацией, сопровождающейся частичным разрушением микропористой структуры и образованием макропор, что снижает структурную прочность материала.

Несмотря на высокий уровень активации при соотношениях 1:3 и 1:4, визуальные различия в структуре образцов и данные элементного анализа указывают на более чистую и однородную структуру АУ при соотношении 1:3. В случае соотношения 1:4 вероятно накопление остатков щёлочи, что приводит к гетерогенности структуры и потенциальному ухудшению эксплуатационных свойств. Таким образом, увеличение доли КОН способствует развитию пористой структуры АУ, однако соотношение 1:3 является оптимальным для получения материала с развитой микропористостью и высокой удельной поверхностью.

4.3. Влияние условий активации на влагоудерживающую способность

Результаты исследования подтверждают, что содержание активирующего агента играет ключевую роль в формировании пористой структуры АУ и напрямую влияет на его влагоёмкость и влагоудерживающую способность. Экспериментальные данные показали, что оптимальное массовое соотношение сорбента и КОН 1:3 обеспечивает гармоничное сочетание микро- и мезопор, формируя максимально доступную удельную поверхность для адсорбции воды. Этот фактор позволяет существенно замедлить процесс испарения влаги как при комнатной температуре (22 °C), так и при повышенной температуре (50 °C), обеспечивая стабильное удержание воды на протяжении всего эксперимента.

Образцы с увеличенной долей КОН до 1:4 продемонстрировали лишь незначительное улучшение влагоудерживающей способности по сравнению с оптимальным вариантом 1:3, что указывает на наличие порогового значения массового соотношения активирующего агента. В то же время снижение содержания КОН до 1:2 и 1:1 приводило к заметному ухудшению адсорбционных свойств материала, особенно при повышенной температуре, где скорость испарения влаги была значительно выше. Эти наблюдения чётко коррелируют с результатами анализа текстурных характеристик АУ: менее развитая микропористая структура у образцов с пониженной концентрацией КОН ограничивает удержание воды, в то время как избыточное количество активирующего агента не обеспечивает дополнительного положительного эффекта, несмотря на увеличение общего объёма пор.

Таким образом, полученные данные демонстрируют прямую связь между текстурными характеристиками АУ и его функциональной способностью удерживать влагу. В частности, сочетание микро- и мезопор в оптимальном образце 1:3 создаёт структурную основу для эффективного замедления испарения и накопления воды, что является критически важным для сельского хозяйства в условиях дефицита водных ресурсов. Результаты подтверждают перспективность использования АУ в качестве влагосберегающего материала и подчеркивают необходимость точного контроля параметров химической активации для достижения требуемых эксплуатационных характеристик. Однако активированный уголь может оказывать

и потенциальное влияние на почвенные экосистемы. Введение АУ в почву изменяет структуру микробных сообществ и их функции, снижая доступность гидрофобных органических загрязнителей для разложения микроорганизмами и растений, что снижает фитотоксичность, но может ограничивать биodeградацию некоторых соединений (Rahi et al., 2012). Кроме того, остатки химических активаторов могут изменять рН почвы и доступность элементов для растений. Таким образом, для безопасного и эффективного использования АУ в сельском хозяйстве необходимы дальнейшие исследования долговременной стабильности, циклов увлажнения–высыхание и влияния на микробиоту и биогеохимию почвы.

4.4. Экологические аспекты и ограничения исследования

Внесение в почву углеродных мелиорантов, характеризующихся развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью, способствует существенному изменению физико-химических условий среды (Rizhiia et al., 2012). Это не только увеличивает адсорбцию влаги, но и улучшает удержание ключевых минеральных элементов, в частности NO_3 (Sviderskii et al., 2025, Fan et al., 2023). Для обоснования преимуществ синтезированного АУ и оценки его экологической значимости в рамках современных агротехнологий необходимо сопоставить его характеристики с широко применяемыми аналогами. В таблице 3 представлен сравнительный анализ функциональных и экологических параметров полученного материала в контексте таких мелиорантов, как традиционный биоуголь, синтетические гидрогели и природные цеолиты

Таблица 3. Сравнительная характеристика влагосберегающих материалов

Критерий	АУ (данная работа)	Биоуголь	Гидрогели	Цеолиты
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	Высокая >2900	Средняя 100–500	-	Средняя 400–800
Удержание NO_3 и влаги	Высокое	Среднее	Очень высокое	Высокое
Долгосрочная стабильность	Высокая (углеродный каркас)	Высокая	Низкая (биodeградация)	Очень высокая (минерал)
Влияние на рН почвы	Риск повышения (остатки КОН)	Слабое повышение	Нейтральное	Нейтральное
Экотоксичность	Низкая (после промывки)	Минимальная	Потенциальный риск (мономеры)	Нулевая

В отличие от биоугля активированный уголь обладает в 5–10 раз большей удельной поверхностью (Khan et al., 2024). Это позволяет не только удерживать влагу за счет капиллярной конденсации в мезопорах, но и эффективно адсорбировать питательные вещества, предотвращая их вымывание.

В сравнении с синтетическими гидрогелями, АУ более устойчив к циклам «замораживание–оттаивание» и не теряет структурную целостность в почве. Гидрогели способны поглощать объемы воды, в 500–600 раз превышающие их собственный вес (Kumar et al., 2025). Несмотря на то, что синтезированный АУ уступает гидрогелям по абсолютному объему поглощаемой воды, он обладает преимуществом в виде высокой сорбционной способности к минеральным нутриентам и более высокой структурной стабильности в

почвенном профиле, что делает его перспективной альтернативой полимерным влагоудерживающим агентам.

Природные и синтетические цеолиты также широко применяются в агротехнологиях как структурообразователи почв. Благодаря своей жесткой алюмосиликатной структуре и высокой катионообменной емкости, они эффективно удерживают ионы NH_4^+ и калия K^+ , предотвращая их вымывание из прикорневой зоны. Однако, по сравнению с синтезированным АУ, цеолиты обладают значительно меньшей удельной поверхностью и ограниченным объемом мезопор. В то время как цеолиты работают преимущественно как ионообменники, оптимизированный АУ обеспечивает более эффективное капиллярное удержание влаги за счет развитой пористости и наличия полярных функциональных групп на поверхности (Akhmetzhanova et. al., 2025).

С точки зрения экологической устойчивости, производство АУ из рисовой шелухи соответствует принципам циркулярной экономики, обеспечивая рациональную утилизацию сельскохозяйственных отходов. Применение химической активации КОН требует строгого контроля стадии промывки для исключения негативного влияния на рН почвенного раствора, однако, при соблюдении технологии, полученный пористый каркас становится стабильной средой для развития полезной почвенной микробиоты.

Таким образом, оптимизированный АУ представляет собой экологически безопасную альтернативу полимерным влагоудерживающим агентам, способствуя восстановлению деградированных земель и снижению пестицидной нагрузки за счет высокой адсорбционной способности. Это позволяет рассматривать активированный уголь из рисовой шелухи как более эффективный агент для прямого влагосбережения в сельскохозяйственном секторе.

5. Заключение

В ходе исследования были всесторонне проанализированы текстурные, поверхностные и адсорбционные характеристики АУ, полученного из растительных остатков при различных массовых соотношениях сорбента и КОН. Результаты экспериментов показали, что условия химической активации оказывают существенное влияние на формирование пористой структуры, величину удельной поверхности и распределение функциональных групп на поверхности материала. Оптимальные адсорбционные свойства были достигнуты при соотношении 1:3. Оно обеспечивает удельную поверхность $2900,0 \text{ м}^2/\text{г}$ и стабильное удержание влаги в течение 150 мин при температурах до 50°C .

Образец 1:4 также демонстрировал хорошие показатели удержания влаги, однако скорость испарения была несколько выше. В то же время материалы с меньшими соотношениями сорбента и КОН (1:2 и 1:1) характеризовались более быстрым снижением содержания влаги, что указывает на менее развитую пористую структуру и ограниченную микропористость. Следует отметить, что в рамках данной работы не оценивалась долговременная стабильность влагоудерживающих свойств материала, включая влияние повторяющихся циклов увлажнения–высыхания. Учитывая практическую направленность исследования, анализ устойчивости структуры АУ при длительной эксплуатации представляет собой важное направление дальнейших исследований.

Результаты ИК Фурье-спектроскопии подтвердили наличие функциональных групп О-Н, С=О и С-О, способствующих связыванию воды и накоплению питательных веществ.

Полученные данные подчеркивают, что правильный выбор условий активации и массового соотношения сорбента и КОН позволяет эффективно управлять свойствами АУ в зависимости от задач его практического применения. АУ, синтезированный в оптимальных условиях, может быть использован в качестве влагосберегающего почвенного субстрата, что особенно актуально для регионов с ограниченными водными ресурсами. Кроме того, материал перспективен для создания комплексных удобрений с постепенным высвобождением питательных веществ, применения в гидропонных системах, а также для очистки воды и снижения потерь влаги при хранении и транспортировке сельскохозяйственной продукции.

Возможные направления дальнейших исследований включают оптимизацию параметров активации для других видов биомассы, изучение долговременной стабильности влагоудерживающей способности материалов, а также анализ влияния функциональных групп на взаимодействие АУ с различными типами удобрений и микроэлементов. Дополнительно представляет интерес исследование комбинированного применения АУ с другими влагосберегающими материалами и природными минералами с выраженными сорбционными свойствами (цеолиты, диатомиты и др.), а также оценка его поведения в условиях различных климатических зон.

Таким образом, проведённое исследование демонстрирует высокую практическую значимость АУ как эффективного влагосберегающего материала и создаёт научную основу для его внедрения в современные водосберегающие агротехнологии и дальнейшего развития устойчивого сельского хозяйства в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и климатических изменений.

6. Вспомогательный материал: нет

7. Вклады авторов

Концептуализация – Д.А., Е.Д., О.Д.; методология – Д.А., М.О.; программное обеспечение – Д.А., З.Н.; валидация – О.Д., Е.Д.; формальный анализ – А.Ж., М.О.; исследование – Д.А., Е.Д., О.Д.; ресурсы – Е.Д.; курирование данных – О.Д.; написание и подготовка оригинального черновика – Д.А., А.Ж.; написание, рецензирование и редактирование – Д.А.; визуализация – З.Н.; руководство – Е.Д.; администрирование проекта – О.Д.; получение финансирования – Е.Д. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Досжанов, Ерлан – PhD, доцент, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; заведующий лабораторией Нанобиотехнологий, Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан, 050012; doszhanov_yerlan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3454-8889>

Ахметжанова, Дана – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; младший научный сотрудник, Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан, 050012; adana128128@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3670-9460>

Жумажанов, Арман – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; лаборант высшей категории, Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан, 050012; jumajanmarman@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-6256-9814>

Досжанов, Оспан – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Алматинский технологический университет, ул. Толе би, 100, Алматы, Казахстан, 050012; ospan.doszhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2292-8742>

Нұрбол, Зере – ученица 11-класса, Назарбаев Интеллектуальная школа естественно-математического направления, ул. Елибаева, 2, Алматы, Казахстан, 050006; zere2301nm@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-1481-2733>

Оспан, Мағжан – ученик 10 класса, Жоо High School, ул. Байтерекова, 3, Алматы, Казахстан, 050038; ospanmagzhan9@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0967-655X>

9. Финансирование: данное исследование по получению и изучению свойств активированного угля из растительных остатков выполняется в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № ГФ23489070).

10. Благодарности: нет

11. Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Abdolla, N. S., Nysanbaeva, A. S., & Äbdirazaq, A. K. (2024). Changes in air temperature in Kyzylorda region during 1961–2020 (Qyzylorda oblysyndagy aua temperaturasyrynyn 1961–2020 zhyldar aralygynda özgerui in Kazakh). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya zhane ekologiya)*, 1(112), 65–76. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-65-78>
2. Abhishek, K., Shrivastava, A., Vimal, V., Gupta, A. K., Bhujbal, S. K., Biswas, J. K., & Kumar, M. (2022). Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*, 853, 158562. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158562>
3. Afshar, M., & Mofatteh, S. (2024). Biochar for a sustainable future: environmentally friendly production and diverse applications. *Results in Engineering*, 23, 102433. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102433>
4. Akhmetzhanova, D., Sabitov, A., Doszhanov, Y., Atamanov, M., Saurykova, K., Zhumazhanov, A., Atamanova, T., Kerimkulova, A., Velasco, L. F., Zhumagalieva, A., Jandosov, J., & Doszhanov, O. (2025). Zeolites and activated carbons in hydroponics: a systematic review of mechanisms, performance metrics, techno-economic analysis and life-cycle assessment. *Sustainability*, 17(24), 10977. <https://doi.org/10.3390/su172410977>
5. Ayaz, M., Feizienė, D., Tilvikienė, V., Akhtar, K., Stulpinaitė, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability*, 13, 1330. <https://doi.org/10.3390/su13031330>
6. Bardestani, R., Patience, G. S., & Kaliaguine, S. (2019). Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements - BET, BJH, and DFT. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(11), 2781–2791. <https://doi.org/10.1002/cjce.23632>
7. Barrett, E. P., Joyner, L. G., & Halenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 373–380. <https://doi.org/10.1021/ja01145a126>
8. Brar, B., Saharan, B. S., Seth, C. S., Kamboj, A., Bala, K., Rajput, V. D., & Duhan, J. S. (2024). Nanobiochar: Soil and plant interactions and their implications for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103077. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103077>
9. Chen, L., Chen, Q., Rao, P., Yan, L., Shakib, A., & Shen, G. (2018). Formulating and optimizing a novel biochar-based fertilizer for simultaneous slow-release of nitrogen and immobilization of cadmium. *Sustainability*, 10(8), 2740. <https://doi.org/10.3390/su10082740>
10. Dadhich, A. (2022). Engineered biochar as feed supplement and other husbandry applications. In *Engineered biochar: fundamentals, preparation, characterization and applications* (pp. 319–329). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2488-0_17
11. Doszhanov, E. O., Sabitov, A. N., Mansurov, Z. A., Doszhanov, O. M., Zhandosov, Zh. M., & Rakhymzhan, N. (2023). Method for obtaining sorbent from plant raw materials (Sposob polucheniya sorbenta iz rastitelnogo syr'ya in Russian) [Patent RK No. 8681]. <https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownloadFilePdf?patentId=382949&lang=ru>
12. Doszhanov, Y., Atamanov, M., Jandosov, J., Saurykova, K., Bassygarayev, Z., Orazbayev, A., & Sabitov, A. (2024). Preparation of granular organic iodine and selenium complex fertilizer based on biochar for biofortification of parsley. *Scientifica*, 2024, 6601899. <https://doi.org/10.1155/2024/6601899>

13. Feng, W., Wang, T., Yang, F., Cen, R., Liao, H., & Qu, Z. (2023). Effects of biochar on soil evaporation and moisture content and the associated mechanisms. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00776-7>
14. Hiremath, M. N., Shivayogimath, C. B., & Shivalingappa, S. N. (2012). Preparation and characterization of granular activated carbon from corn cob by KOH activation. *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 2(3), 84–87.
15. Jedynek, K., & Charmas, B. (2024). Adsorption properties of biochars obtained by KOH activation. *Adsorption*, 30(2), 167–183. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00399-7>
16. Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84–87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
17. Maleki, A., & Bozorg, A. (2023). Algal biochar of unique structure as a robust alternative to manipulate mixed-matrix membranes performance and fouling resistance. *Results in Engineering*, 18, 101043. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101043>
18. McLaren, R. L., Laycock, C. J., Brousseau, E., & Owen, G. R. (2021). Examining slit pore widths within plasma-exfoliated graphitic material utilizing Barrett–Joyner–Halenda analysis. *New Journal of Chemistry*, 45, 12071–12080. <https://doi.org/10.1039/D1NJ01702K>
19. Mopoung, S., Udeye, V., Viruhpintu, S., Yimtragool, N., & Unhong, V. (2020). Water treatment for fish aquaculture system by biochar-supplemented planting panel system. *The Scientific World Journal*, 2020, 7901362. <https://doi.org/10.1155/2020/7901362>
20. Ndede, E. O., Kurebito, S., Idowu, O., Tokunari, T., & Jindo, K. (2022). The potential of biochar to enhance the water retention properties of sandy agricultural soils. *Agronomy*, 12(2), 311. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020311>
21. Sabitov, A., Atamanov, M., Doszhanov, O., Saurykova, K., Tazhu, K., Kerimkulova, A., & Doszhanov, Y. (2024). Surface characteristics of activated carbon sorbents obtained from biomass for cleaning oil-contaminated soils. *Molecules*, 29(16), 3786. <https://doi.org/10.3390/molecules29163786>
22. Sabitov, A. N., Doszhanov, E. O., Turganbai, S., & Nurbolatuly, D. (2024). Method for obtaining granular fertilizer based on biochar (Sposob polucheniya granulirovannogo udobreniya na osnove pirouglya in Russian) [Patent RK No. 8791]. <https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownloadFilePdf?patentId=383847&lang=ru>
23. Hagemann, N., Spokas, K., Schmidt, H.-P., Kägi, R., Böhler, M. A., & Bucheli, T. D. (2018). Activated carbon, biochar and charcoal: linkages and synergies across pyrogenic carbon's ABCs. *Water*, 10, 182. <https://doi.org/10.3390/w10020182>
24. Saletnik, B., Zaguła, G., Bajcar, M., Tarapatsky, M., Bobula, G., & Puchalski, C. (2019). Biochar as a multifunctional component of the environment. *Applied Sciences*, 9, 1139. <https://doi.org/10.3390/app9061139>
25. Schmidt, H. P., Hagemann, N., Draper, K., & Kammann, C. (2019). The use of biochar in animal feeding. *PeerJ*, 7, e7373. <https://doi.org/10.7717/peerj.7373>
26. Williams, N. E., Oba, O. A., & Aydinlik, N. P. (2022). Modification, production, and methods of KOH-activated carbon. *ChemBioEng Reviews*, 9(2), 164–189. <https://doi.org/10.1002/cben.202100030>
27. Zhumagulov, I. I., & Satbaldieva, Zh. Zh. (2024). Analysis of the influence of meteorological conditions on the productivity of spring wheat in 2023 based on the Tayinsha meteorological station of North Kazakhstan region (Analiz vliyaniya meteorologicheskikh usloviy na produktivnost' yarovoy pshenitsy v 2023 godu na primere meteorologicheskoy stantsii Tayinsha Severo-Kazakhstanskoy oblasti in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya)*, 3(114), 51–58. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-114-3-51-59>
28. Rahi, A. A., Younis, U., Ahmed, N., Ali, M. A., Fahad, Sh., Sultan, H., Zarei, T., Danish, S., Taban, S., Enshasy, H. A. E., Tamunaidu, P., Alotaibi, J. M., Alharbi, S. A., & Datta, R. (2022). Toxicity of cadmium and nickel in the context of applied activated carbon biochar for

- improvement in soil fertility. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 2, 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.035>
29. Rizhiya, E. Y., Buchkina, N. P., & Balashov, E. V. (2020). Influence of biochar on the content of mineral nitrogen forms in sod-podzolic loamy sand soil with different degrees of cultivation (Vliyanie biouglya na sodержanie mineral'nyh form azota v dernovo-podzolistoj supeschanoj pochve s raznoj stepen'yu okul'turennosti in Russian). *Soil Science (Pochvovedenie)*, 6, 727–736. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060095>
30. Sviderskiy, S. A., Morozova, Ya. V., Grabchak, A. A., Kulikova, M. V., & Maksimov, A. L. (2025). CO₂ hydrogenation reaction on biochar-based catalysts (Reakciya gidrirovaniya CO₂ na katalizatorah na osnove biouglya in Russian). *Petrochemistry (Neftekhimiya)*, 63(2), 239-249. <https://doi.org/10.31857/S0028242123020089>
31. Fan, Y., Su, J., Wang, Z., Liu, S., Li, X., & Hou, C. (2023). Improvement of the specific surface area of biochar by calcium-precipitated nanoparticles synthesized by microbial induction as a template skeleton: Removal mechanism of tetracycline in water. *Journal of Environmental Management*, 348, 119279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119279>
32. Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: a review. *Plants*, 13(2), 166. <https://doi.org/10.3390/plants13020166>
33. Kumar, R., Kumar, M., Chand, G. S., Parihar, M. S., Kundu, R., & Khandelwal, A. (2020). Hydrogel and its effect on soil moisture status and plant growth: a review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(3), 1746–1753. https://www.researchgate.net/publication/348927854_Hydrogel_and_its_effect_on_soil_moisture_status_and_plant_growth_A_review

Ауыл шаруашылығында ылғалды сақтауды арттыру мақсатында активтендірілген көмірді биомассадан дайындау мен оңтайландыру

Ерлан Досжанов, Дана Ахметжанова, Арман Жумажанов, Оспан Досжанов, Зере Нұрбол, Мағжан Оспан

Андатпа. Жаһандық климаттың өзгеруі және су ресурстарының шектеулілігі жағдайында ауыл шаруашылығын тұрақты дамыту ылғал ұстағыш қабілеті жоғары инновациялық материалдарды, соның ішінде ауыл шаруашылығы қалдықтары негізіндегі көміртекті субстраттарды енгізуді талап етеді. Бұл жұмыста сорбент пен калий гидроксидінің (КОН) әртүрлі массалық қатынастарында (1:1, 1:2, 1:3 және 1:4) күріш қауызынан синтезделген активтендірілген көмірдің (АК) текстуралық, морфологиялық және адсорбциялық сипаттамаларына кешенді зерттеу жүргізілді. Жұмыстың мақсаты - тиімді ылғал сақтауды қамтамасыз ететін кеуекті құрылымды қалыптастыру үшін химиялық активтендіру жағдайларын оңтайландыру. Әдістеме тығыздық функционал теориясын (DFT) және Барретт–Джойнер–Халенда (ВЖН) әдісін қолдануды қамтыды. Нәтижелер көрсеткендей, кеуектердің максималды жиынтық көлемі (1,6 см³/г) және дамыған меншікті беті (2900 м²/г) 1:3 қатынасында қол жеткізіледі. ИҚ-Фурье спектроскопиясы су молекулаларын байланыстыруда шешуші рөл атқаратын гидрофильді функционалды топтардың (О-Н, С=О, С-О) бар екенін растады. Үш қайталанбалы өлшеммен (n=3) орындалған ылғал ұстау тәжірибелері 1:3 үлгісінің 22°C және 50°C температураларда ылғалды тұрақты сақтайтынын көрсетті. Бұл көрсеткіш активтендіру дәрежесі төмен үлгілер (1:1, 1:2) мен артық активтендірілген үлгілерден (1:4) айтарлықтай жоғары. Салыстырмалы талдау оңтайландырылған АК-ның меншікті беті бойынша дәстүрлі биокөмір мен цеолиттерден басым екенін және топырақтағы көміртекті қаңқаның ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ететінін көрсетті. Алынған

деректер ылғалдың булануын бәсеңдету процестеріндегі микро- және мезокеуектер тепе-теңдігінің шешуші рөлін дәлелдейді және бұл материалдарды құрғақшылық аймақтардағы агроценоздардың өнімділігін арттыру үшін экологиялық қауіпсіз ылғал сақтаушы агенттер ретінде пайдаланудың жоғары перспективасын айқындайды.

Түйін сөздер: белсендірілген көмір; ауыл шаруашылығы қалдықтары; ылғал сақтайтын субстрат; кеуекті құрылым; адсорбциялық қасиеттер.

Development and optimization of biomass-derived activated carbon for enhancing water retention in agriculture

Yerlan Doszhanov, Dana Akhmetzhanova, Arman Zhumazhanov, Ospan Doszhanov, Zere Nurbol, Ospan Magzhan

Abstract. Sustainable agriculture amid climate change and water scarcity necessitates innovative materials with enhanced water-holding capacity, such as biomass-based carbon substrates. This study investigates the textural and adsorption characteristics of activated carbon (AC) synthesized from rice husk using varying mass ratios of sorbent to potassium hydroxide (KOH) (1:1, 1:2, 1:3, and 1:4). The objective was to optimize chemical activation conditions to develop a porous structure for efficient water retention. The methodology employed density functional theory (DFT) and the Barrett–Joyner–Halenda (BJH) method for structural analysis. Results indicated that a 1:3 ratio achieves the maximum total pore volume (1.6 cm³/g) and a high specific surface area (2900 m²/g). Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed hydrophilic functional groups (O-H, C=O, C-O) essential for moisture binding. Water retention experiments, conducted in triplicate (n=3), demonstrated that the 1:3 sample maintains superior moisture stability at both 22°C and 50°C compared to low-activation (1:1, 1:2) and over-activated (1:4) samples. Comparative analysis reveals that the optimized AC outperforms traditional biochar and zeolites in specific surface area while ensuring the long-term stability of the carbon framework. These findings confirm the critical role of balanced micro- and mesoporosity in slowing water evaporation. The study suggests that such materials are promising, environmentally friendly, moisture-conserving agents for increasing agroecose productivity in arid regions.

Keywords: activated carbon; agricultural waste; moisture-retaining substrate; porous structure; adsorption properties.