ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME - 9

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 9

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

УДК 553.611:549.67:66.067.8

МЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ БЕНТОНИТА НАВБАХОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И САПРОПЕЛЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Эргашева Ш.А.
Навоийское отделение Академии наук Республики Узбекистан
Шарипов С.Ш.
Навоийский государственный горно-технологический университет
Жаналиева Р.Н.
Центрально-Азиатский инновационный университет, г. Шымкент, Казахстан
Тагаев С.У
Частный университет «SHARQ» в городе Навои

Аннотация. В работе исследованы процессы механической активации бентонита Навбахорского месторождения и сапропеля Ташкентской области с целью повышения их сорбционных характеристик и расширения возможностей применения в экологических технологиях. Механическая обработка осуществлялась на планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 при различных режимах измельчения. Изучено влияние скорости вращения, продолжительности обработки, соотношения массы шаров к массе материала и влажности среды на физико-химические свойства материалов. Для характеристики образцов использованы методы БЭТ, рентгенофазового анализа, лазерной дифракции, электронной микроскопии, определения катионообменной способности и дзета-потенциала. Установлено, что механическая активация приводит к существенному уменьшению размера частиц, увеличению удельной поверхности и повышению обменной ёмкости материалов. Полученные результаты подтверждают перспективность использования механически активированных бентонита и сапропеля в качестве экологически безопасных сорбентов для очистки загрязнённых почв и водных сред.

Ключевые слова: бентонит, сапропель, механическая активация, сорбент, удельная поверхность, катионообменная способность.

Abstract. This study investigates the mechanical activation of bentonite from the Navbahor deposit and sapropel from the Tashkent region in order to improve their sorption properties and expand their environmental applications. Mechanical treatment was performed using a Retsch PM 400 planetary ball mill under various operating conditions. The effects of milling speed, treatment duration, ball-to-powder ratio, and moisture content were evaluated. The materials were characterized by BET surface area analysis, X-ray diffraction, laser diffraction

particle sizing, scanning electron microscopy, cation exchange capacity determination, and zeta potential measurements. Mechanical activation resulted in significant particle size reduction, increased specific surface area, and enhanced ion-exchange properties. The obtained results demonstrate the potential of activated bentonite and sapropel as environmentally friendly sorbents for soil and water remediation.

Keywords: bentonite, sapropel, mechanical activation, sorbent, BET surface area, cation exchange capacity.

Annotatsiya. Ushbu ishda Navbahor koni bentoniti va Toshkent viloyati sapropelining sorbsion xususiyatlarini yaxshilash hamda ekologik texnologiyalarda qo‘llash imkoniyatlarini kengaytirish maqsadida ularning mexanik faollashtirish jarayonlari o‘rganildi. Mexanik ishlov berish Retsch PM 400 planetar sharli tegirmonida turli maydalash rejimlarida amalga oshirildi. Aylanish tezligi, ishlov berish davomiyligi, sharlar massasi va material massasi nisbati hamda muhit namligining materiallarning fizik-kimyoviy xossalariga ta’siri tadqiq qilindi. Namunalarni tavsiflash uchun BET usuli, rentgen-fazaviy tahlil, lazer difraksiyasi, elektron mikroskopiya, kation almashinish sig‘imi va zeta-potensialni aniqlash usullaridan foydalanildi. Mexanik faollashtirish natijasida zarrachalar o‘lchami sezilarli darajada kamayishi, solishtirma sirt maydoni ortishi va materiallarning almashinish sig‘imi oshishi aniqlandi. Olingan natijalar mexanik faollashtirilgan bentonit va sapropeldan ifloslangan tuproqlar hamda suv muhitlarini tozalashda ekologik xavfsiz sorbentlar sifatida foydalanish istiqbolli ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: bentonit, sapropel, mexanik faollashtirish, sorbent, solishtirma sirt maydoni, kation almashinish sig‘imi.

1. ВВЕДЕНИЕ.

В XX–XXI веках загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами и органическими токсикантами стало одной из наиболее актуальных экологических проблем. Её решение во многом связано с разработкой дешёвых и доступных сорбционных материалов природного происхождения. В этой связи всё больший интерес вызывают бентонитовые глины и сапропели, обладающие развитой поверхностью, высокой обменной способностью и экологической безопасностью. Узбекистан располагает значительными запасами бентонитов, среди которых важное место занимает Навбахорское месторождение. Одновременно республика обладает значительными ресурсами сапропелей, которые остаются недостаточно востребованными в промышленности.

В последние десятилетия природные алюмосиликаты и органоминеральные материалы привлекают внимание исследователей как

ISSN 3030-3907

перспективные сорбенты для решения экологических задач [1]. Бентонит относится к группе слоистых алюмосиликатов типа 2:1, основным минералом которых является монтмориллонит. Его ключевые свойства высокая способность к набуханию, низкая гидравлическая проводимость и способность к ионному обмену делают его эффективным барьером для удаления загрязнителей, в том числе радиоактивных отходов, из окружающей среды [2, 3]. По данным отечественных и зарубежных авторов, катионообменная способность природных бентонитов варьирует от 60 до 150 мг-экв/100 г в зависимости от содержания монтмориллонита и природы обменных катионов. Наиболее эффективны натриевые формы бентонитов, характеризующиеся повышенной степенью набухания и развитой удельной поверхностью.

В Узбекистане значительные запасы бентонитовых глин сосредоточены на Навбахорском месторождении Навоийской области. Согласно исследованиям [4], навбахорские бентониты содержат от 60 до 80 % монтмориллонита и относятся к высококачественным природным сорбентам; суммарное содержание диоксида кремния и оксида алюминия превышает 70 %.

Особый интерес в последние годы вызывает механическая активация бентонитов. Показано, что высокоэнергетическое измельчение способствует разрушению агрегатов частиц, увеличению числа активных центров и частичной аморфизации кристаллической структуры, в результате чего возрастает удельная поверхность и улучшаются сорбционные характеристики материала [5]. По данным [6], механическая обработка в планетарных мельницах приводит к снижению размера частиц в 2–5 раз и увеличению удельной поверхности на 30–80 %; степень структурных изменений зависит от продолжительности обработки и энергии измельчения.

Не менее перспективным природным материалом является сапропель органоминеральный осадок пресноводных водоёмов, образующийся в результате многолетнего накопления и разложения остатков водной флоры и фауны. В его составе содержатся гуминовые и фульвокислоты, аминокислоты, углеводы, микроэлементы и биологически активные соединения. Установлено, что гуминовые вещества сапропеля образуют устойчивые комплексы с ионами тяжёлых металлов, благодаря чему сапропель рассматривается как перспективный материал для ремедиации загрязнённых почв и очистки сточных вод [7]. Гуминовые вещества выступают многофункциональными природными агентами в устойчивом сельском хозяйстве, открывая новые возможности для улучшения здоровья почвы, продуктивности растений и устойчивости окружающей среды [14].

ISSN 3030-3907

Содержание гуминовых кислот в различных типах сапропеля может достигать 20 % от сухой массы; наличие карбоксильных и фенольных групп обеспечивает высокую катионообменную способность материала, которая находится в диапазоне 150–250 мг-экв/100 г, что сопоставимо с показателями многих природных алюмосиликатов или превышает их.

Особое внимание уделяется комбинированному использованию минеральных и органоминеральных сорбентов. Сочетание бентонита и гуминсодержащих материалов позволяет получать композиты с улучшенными физико-химическими характеристиками: бентонит обеспечивает высокую механическую прочность и развитую поверхность, тогда как гуминовые вещества сапропеля повышают способность к комплексообразованию с тяжёлыми металлами. Согласно концепции синергетического эффекта, совместное применение бентонита и сапропеля позволяет одновременно реализовать несколько механизмов связывания загрязнителей: ионный обмен, физическую адсорбцию, поверхностное комплексообразование и хелатирование, что значительно повышает эффективность удаления ионов свинца, кадмия, меди, цинка и других токсичных элементов.

Несмотря на значительное число работ по раздельному использованию бентонитов и сапропелей, сведения о комплексном сравнительном изучении этих материалов из местного сырья Узбекистана практически отсутствуют. Недостаточно изучено влияние механической активации на изменение структуры, пористости и сорбционных характеристик обоих материалов в идентичных условиях обработки.

Целью настоящей работы является исследование влияния механической активации на физико-химические свойства бентонита Навбахорского месторождения и сапропеля Ташкентской области как способа повышения их сорбционных свойств.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В качестве объектов исследования использованы два вида местного природного сырья Республики Узбекистан: бентонитовая глина Навбахорского месторождения Навоийской области и сапропель озера Ташкентской области.

Бентонит представляет собой алюмосиликатный минерал с преобладанием монтмориллонита, обладающий развитой поверхностью, высокой способностью к набуханию и катионному обмену. Химический состав бентонита Навбахора (по данным РФА) приведён на рисунке 1. Основу состава составляют SiO_2 (~58 %) и Al_2O_3 (~16 %); потери при

ISSN 3030-3907

прокаливании (ППП) находятся в интервале 8–11 %, что указывает на наличие межслоевой воды и структурных ОН-групп.

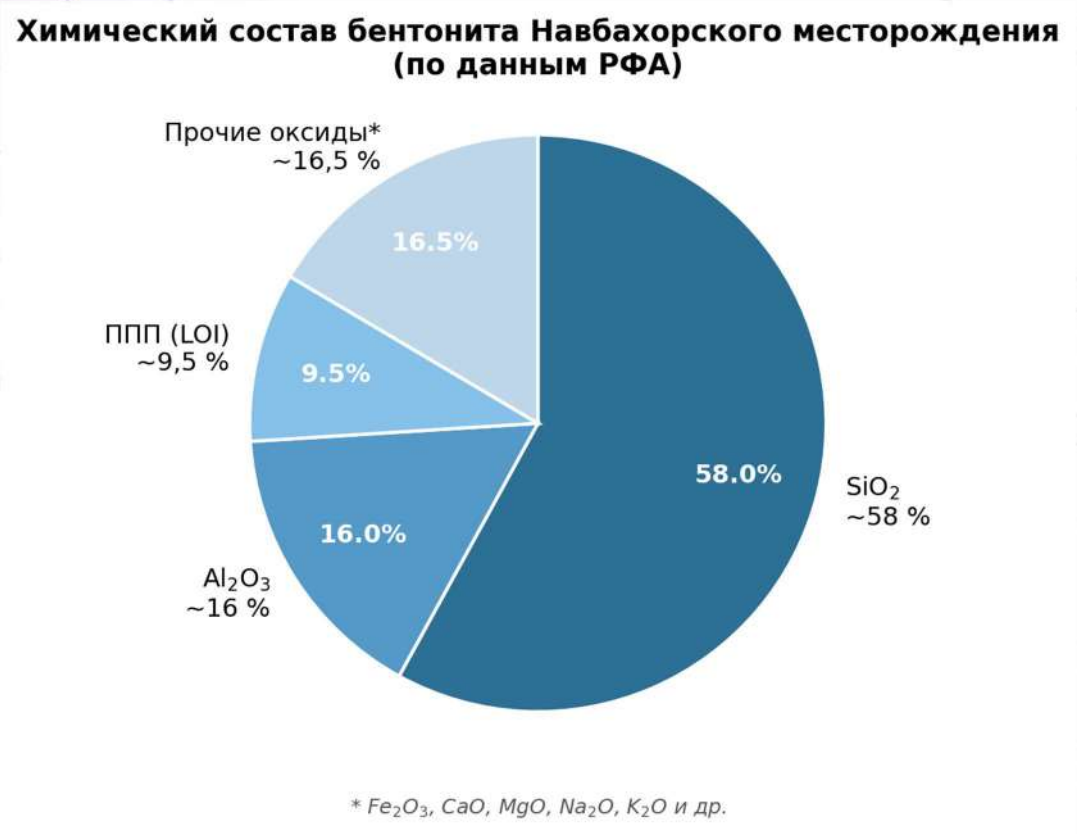


Рисунок 1. Химический состав бентонита Навбахорского месторождения

Сапропель является органоминеральным осадком пресноводных водоёмов, содержащим гуминовые вещества, аминокислоты, микроэлементы и биологически активные соединения (рисунок 2).



Рисунок 2. Качественный состав сапропеля (по литературным данным)

ISSN 3030-3907

Исходные физико-химические характеристики исследуемых материалов представлены на рисунке 3.

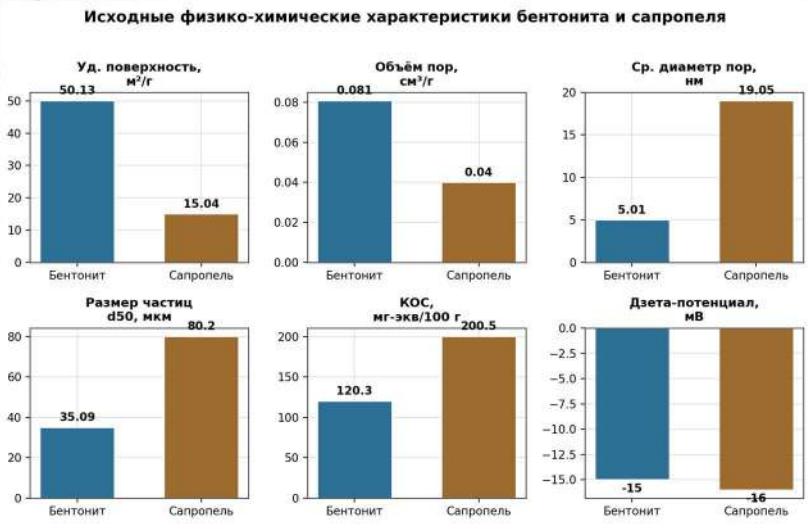


Рисунок 3. Исходные физико-химические характеристики исследуемых материалов

Образцы бентонита сушили на воздухе при температуре не выше 40 °C в течение 72–96 часов. После высушивания материал измельчали в агатовой ступке и просеивали через сито с размером ячеек 0,16 мм. Сапропель после отбора со дна водоёма сушили при температуре 105 °C в течение 24 часов до остаточной влажности менее 8 %, затем измельчали и просеивали через сито 0,25 мм. Полученные исходные материалы обозначали как Б-0 и С-0 соответственно и использовали в качестве контрольных образцов. Общая схема проведения исследования приведена на рисунке 4.

ISSN 3030-3907

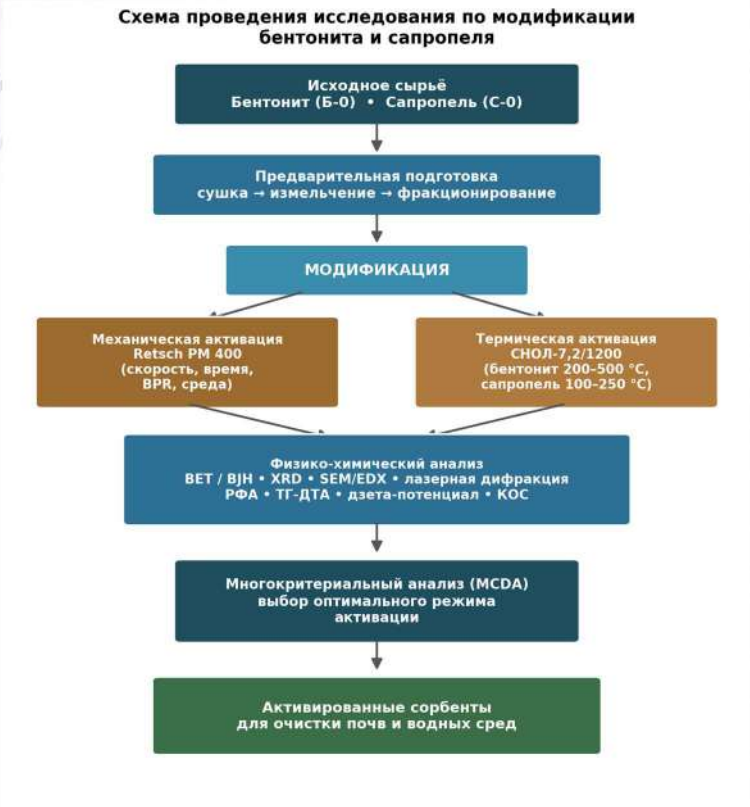


Рисунок 4. Схема проведения исследования по модификации бентонита и сапропеля

Механическую обработку проводили на планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 (Германия). Основными варьируемыми факторами являлись:

– скорость вращения ротора 200 и 500 об/мин (низкая и высокая интенсивность);

– продолжительность обработки 30 и 90 мин (короткая и длительная);

– соотношение массы шаров к массе материала (BPR) 10:1 и 30:1 (низкое и высокое «давление»);

– среда измельчения сухая и влажная (с добавлением 10 % влаги).

Термическую обработку проводили в муфельной печи СНОЛ-7,2/1200. Диапазоны температур для бентонита и сапропеля выбирали раздельно, поскольку их состав принципиально различается: для бентонита 200–500 °C, для сапропеля 100–250 °C. Как отмечается в литературе [7], для сохранения биологических свойств сапропеля не следует превышать 250 °C. Скорость нагрева составляла 12 °C/мин; после завершения процесса образцы охлаждали естественным образом в выключенной печи. Основная дегидроксилизация структуры монтмориллонита начинается выше 600 °C и приводит к существенной потере катионообменной способности, поэтому 500 °C принято в качестве оптимальной верхней границы. Изменения

ISSN 3030-3907

кристаллической структуры сопровождаются уменьшением удельной поверхности и общего объёма пор [19].

Для комплексной характеристики материалов использовали набор современных аналитических методов (таблица 1).

Таблица 1.

Методы исследования и используемое оборудование

BET	Удельная поверхность	Micromeritics ASAP 2020
BJH	Объём и диаметр пор	Micromeritics ASAP 2020
XRD	Фазовый состав	Shimadzu XRD-6100
SEM	Морфология поверхности	Quanta 200 FEG
EDX	Локальный элементный состав	Quanta 200 FEG
Лазерная дифракция	Размер частиц	Mastersizer 3000
РФА (XRF)	Оксидный состав	Bruker S2 Puma
ТГ-ДТА	Термические свойства	STA 449 F3 Jupiter
Дзета-потенциал	Электрокинетические свойства	Zetasizer Nano ZS
ААС	Обменные катионы	Shimadzu AA-7000

Экспериментальное измерение ёмкости катионного обмена обычно включает вытеснение обменных катионов ионом с известным индексом и последующее измерение количества этого иона, извлечённого из образца. Минералы группы монтмориллонита обладают более высокой ёмкостью катионного обмена (ЕКО = 80–150 мг-экв/100 г) по сравнению с каолинитами (ЕКО = 3–15 мг-экв/100 г). Метиленовый голубой (МГ) органический краситель катионного типа, который адсорбируется на отрицательно заряженной поверхности глинистых частиц [15]. Катионообменную способность определяли двумя независимыми методами: методом метиленового синего и методом ацетата аммония (1 М NH_4OAc, pH 7,0). Результаты обоих методов сравнивали между собой; допустимое расхождение не превышало 5 %.

Каждое измерение проводили в трёх параллельных повторностях. Для обработки результатов использовали программу OriginPro 2024.

ISSN 3030-3907

Рассчитывали среднее арифметическое значение, стандартное отклонение (SD), коэффициент вариации (CV) и коэффициент корреляции Пирсона (r). Оптимальный режим активации определяли методом многокритериального анализа решений (MCDA). Весовые коэффициенты критериев приведены на рисунке 5. Суммарную оценку рассчитывали по нормированным значениям показателей, после чего выбирали образец с максимальным интегральным баллом.



Рисунок 5. Весовые коэффициенты критериев выбора оптимального режима активации (MCDA)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.

Метод БЭТ классический метод адсорбции, позволяющий с высокой точностью определять удельную поверхность материала. Метод предложен в 1938 году и признан «золотым стандартом» характеристики сорбентов. Измерения проводили на автоматическом газоадсорбционном анализаторе Micromeritics ASAP 2020 (США). Каждый образец (примерно 0,2–0,3 г) перед измерением дегазировали в вакууме при 150 °C в течение 4 часов для удаления физически адсорбированной воды и других веществ. Затем образец помещали в сосуд с жидким азотом и измеряли изотермы азота в диапазоне относительных давлений (P/P_0) 0,01–0,99. По результатам получали три основных показателя: S(БЭТ) ($м^2/г$), общий объём пор ($см^3/г$) и средний диаметр пор (нм). Повторяемость результатов составляла менее ±2 %.

Исходный бентонит характеризовался удельной поверхностью 50,13 $м^2/г$ и КОС 120,3 мг-экв/100 г; для сапропеля эти показатели составляли 15,04

ISSN 3030-3907

м²/г и 200,5 мг-экв/100 г соответственно. Механическая активация привела к существенному уменьшению среднего диаметра частиц: по данным лазерной дифракции размер частиц бентонита снизился с 35,09 до 10–15 мкм, а сапропеля с 80,2 до 20–35 мкм. BET-анализ показал увеличение удельной поверхности бентонита до 70–85 м²/г в зависимости от режима обработки, а сапропеля до 20–28 м²/г. Изменение BET-параметров бентонита после механической активации представлено на рисунке 6.

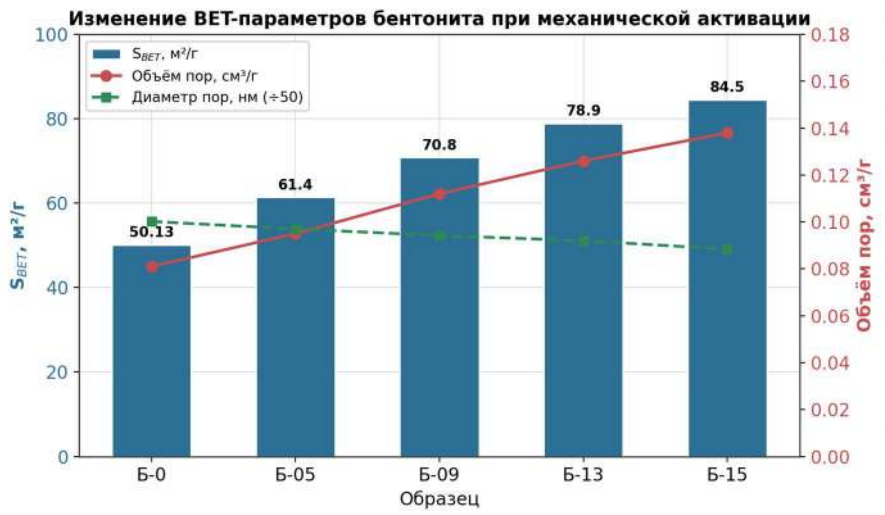


Рисунок 6. Изменение BET-параметров бентонита после механической активации

Анализ данных показывает, что увеличение энергии механической активации сопровождается последовательным ростом удельной поверхности. Максимальное значение наблюдается для образца Б-15, где поверхность увеличивается почти в 1,7 раза по сравнению с исходным образцом. Данный эффект связан с разрушением агрегатов монтмориллонита и образованием новых активных поверхностей. Уменьшение размера частиц способствует увеличению числа доступных сорбционных центров и ускорению массопереноса при адсорбции загрязняющих веществ.

Для определения кристаллической структуры образцов и межслоевого расстояния монтмориллонита (d_{001}) использовали метод рентгенофазового анализа (XRD). Измерения проводили на дифрактометре Shimadzu XRD-6100 (Япония) при следующих параметрах: ток 30 мА, напряжение 40 кВ, угловой диапазон 2θ = 3–70°, шаг 0,02°, время измерения на каждом шаге 1 с. На дифрактограммах идентифицировали основные пики: характерное для монтмориллонита расстояние d_{001} (~14–15 Å, или 1,4–1,5 нм в исходном состоянии), а также примесные минералы (кварц 2θ ≈ 26,7°, кальцит 2θ ≈ 29,4°, иллит 2θ ≈ 8,8°). Степень аморфизации рассчитывали по методике [6] на основе снижения интенсивности кристаллических пиков и роста

ISSN 3030-3907

аморфного «гало». Изменение межслоевого расстояния монтмориллонита приведено на рисунке 7.

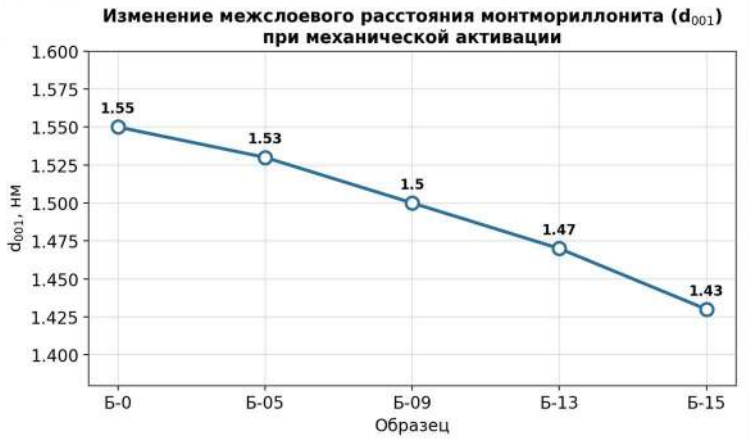


Рисунок 7. Изменение межслоевого расстояния монтмориллонита (d_{001})

Снижение d_{001} свидетельствует о частичном разрушении межслоевой структуры и удалении слабосвязанных молекул воды.

Изменения бентонита и сапропеля под действием температуры, а также температурные интервалы дегидратации и дегидроксилирования изучали методами термогравиметрического и дифференциально-термического анализа (ТГ-ДТА). Основные характеристики сапропеля после механической активации приведены на рисунке 8.

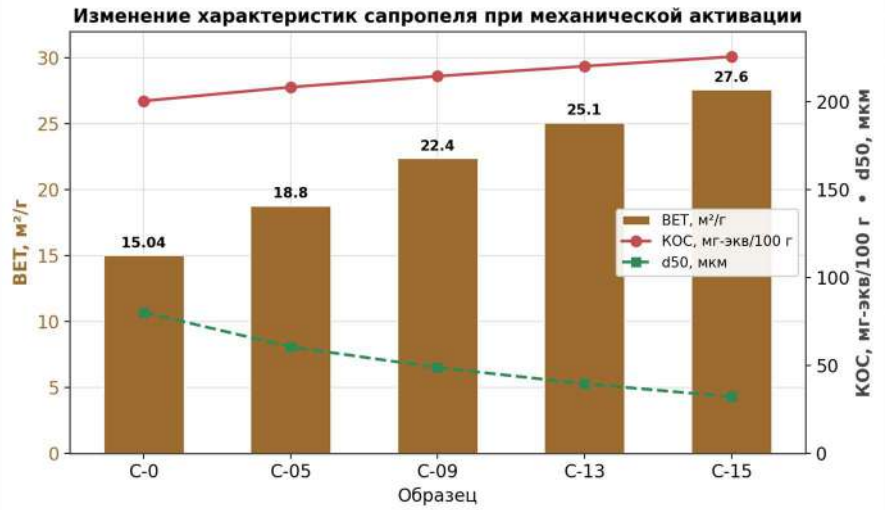


Рисунок 8. Основные характеристики сапропеля после механической активации

С ростом интенсивности обработки наблюдается последовательное увеличение удельной поверхности и катионообменной способности сапропеля при одновременном уменьшении среднего размера частиц d50, что согласуется с характером изменений, отмеченных для бентонита.

Сравнительный анализ активированных бентонита и сапропеля приведён на рисунке 9. Бентонит характеризуется более развитой минеральной поверхностью, тогда как сапропель обладает значительно

ISSN 3030-3907

большей катионообменной способностью благодаря присутствию гуминовых веществ.

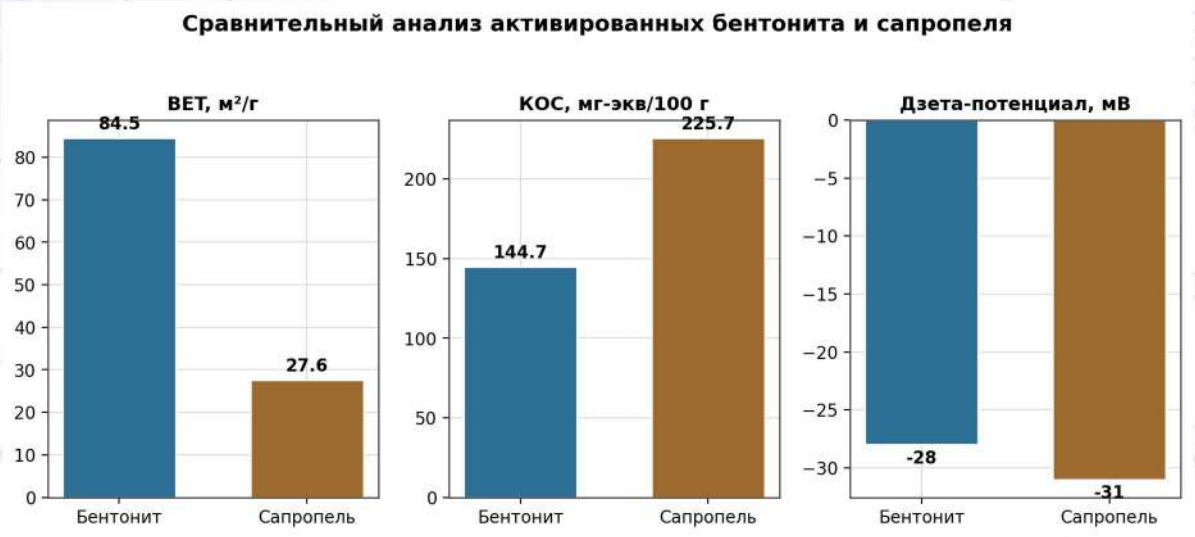


Рисунок 9. Сравнительный анализ активированных бентонита и сапропеля

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В результате проведённых исследований установлено, что механическая активация является эффективным методом направленного изменения структуры и физико-химических свойств природных материалов бентонита Навбахорского месторождения и сапропеля Ташкентской области.

Обработка в планетарной шаровой мельнице приводит к существенному уменьшению среднего размера частиц исследуемых материалов. Для бентонита наблюдалось снижение среднего диаметра частиц более чем в три раза, что сопровождалось разрушением агрегатов и увеличением доступной поверхности.

Механическая активация способствует значительному росту удельной поверхности и пористости материалов. Максимальный эффект достигнут при высокоинтенсивных режимах измельчения (500 об/мин, 90 мин, BPR 30:1), при которых удельная поверхность бентонита увеличивалась более чем на 70 %, а сапропеля почти в два раза по сравнению с исходным состоянием.

Результаты рентгенофазового анализа показали частичную аморфизацию структуры монтмориллонита и уменьшение межслоевого расстояния d_{001}, что свидетельствует о формировании дополнительных дефектов кристаллической решётки и повышении реакционной способности материала.

Установлено увеличение катионообменной способности активированных образцов: для бентонита КОС возрастала примерно до 145 мг-экв/100 г, а для сапропеля до 226 мг-экв/100 г. Рост данного показателя

ISSN 3030-3907

обусловлен увеличением доступности обменных центров и раскрытием функциональных групп поверхности.

Проведённый многокритериальный анализ подтвердил, что механически активированные бентонит и сапропель обладают улучшенными сорбционными характеристиками и могут рассматриваться как перспективная основа для создания экологически безопасных материалов, предназначенных для очистки загрязнённых почв и водных объектов. Полученные результаты создают научную основу для дальнейшей разработки композиционных сорбентов на основе местного минерального и органоминерального сырья Узбекистана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сабиров Б.Т. [и др.]. Комплексное исследование бентонитовых глин перспективных месторождений Узбекистана // Universum: технические науки. 2020. № 8(77). URL: https://7universum.com/en/tech/archive/item/10621 (дата обращения: 02.06.2026).
2. Wagner J.F. Chapter 5.3 Clay liners and waste disposal // Developments in Clay Science. Vol. 5 / eds. F. Bergaya, G. Lagaly. Amsterdam: Elsevier, 2013. P. 663–676.
3. Wilson J., Savage D., Cuadros J., Shibata M., Ragnarsdottir K.V. The effect of iron on montmorillonite stability. (I) Background and thermodynamic considerations // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. Vol. 70. P. 306–322.
4. Тоширов Б.Т., Рахматов Ш.А. Бентониты Узбекистана и перспективы их промышленного использования. Ташкент: Фан, 2004. 256 с.
5. Cheon Y., Kim S., Jeong H.Y. Effects of thermal treatment on bentonite stability and europium(III) leachability // Journal of Analytical Science and Technology. 2025. Vol. 16. Article 6.
6. Lukáč P., Húlan T., Kováčik J. Influence of high-energy milling on clay mineral structure and amorphization // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 301. Article 127614.
7. Stankevica K., Klavins M. Sapropel and its application in environmental technologies // Latvian Journal of Chemistry. 2016. Vol. 55. No. 2. P. 95–107.
8. Исаджанов А.А. Минерально-сырьевой комплекс Узбекистана: проблемы устойчивого развития // Теория и практика современной науки. 2019. № 6(48). С. 232–236.
9. Bergaya F., Lagaly G. Handbook of Clay Science. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2019. 1246 p.
10. Murray H. Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-sepiolite and Common Clays //

Developments in Clay Science. Amsterdam: Elsevier, 2007. 180 p. https://doi.org/10.1016/S1572-4352(06)02008-3
11. Умурова Ш.Ш., Амонов М.Р. Модификация бентонитов навбахорского месторождения для повышения их адсорбционных свойств // Universum: технические науки. 2026. № 1(142).
12. Адизова Ш.Т., Амонов М.Р. Сорбционные характеристики химически модифицированного бентонита // Universum: технические науки. 2024. № 6(123).
13. Garg N., Skibsted J. Thermal activation of pure montmorillonite clay and its reactivity in cement systems // The Journal of Physical Chemistry C. 2014. Vol. 118. No. 21. P. 11464–11477. https://doi.org/10.1021/jp502529d
14. Maffia A., Oliva M., Marra F., Mallamaci C., Nardi S., Muscolo A. Humic Substances: Bridging Ecology and Agriculture for a Greener Future // Agronomy. 2025. Vol. 15. Article 410. https://doi.org/10.3390/agronomy15020410
16. Середин В.В. [и др.]. Влияние структуры бентонитовой глины, активированной давлением, на показатель адсорбции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 81–89.
17. Биннатова Л.А., Ширалиева Э.М., Ягубов А.И., Мурадова Н.М., Нуриев А.Н. Термообработка бентонита и адсорбция метилена голубого // Конденсированные среды и межфазные границы. 2007. Т. 9. № 2. С. 99–101.
18. Бельчинская Л.И., Бондаренко А.В., Губкина М.Л., Петухова Г.А., Селеменев В.Ф. Влияние термического модифицирования на адсорбционные свойства природных силикатов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2006. Т. 6. Вып. 1. С. 80–81.
19. Мосталыгина Л.В., Чернова Е.А., Бухтояров О.И. Кислотная активация бентонитовой глины // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 24. С. 57–61.
20. Orolínová Z. [et al.]. Effect of thermal treatment on the bentonite properties // Arhiv za tehničke nauke. 2012. Vol. 7. No. 1. P. 49–56.
21. Klavins M., Purmalis O. Humic substances and their role in environmental remediation // Environmental Research. 2019. Vol. 170. P. 354–365.
22. Perminova I.V. Humic Substances in Environmental Systems. Moscow: Moscow State University Press, 2018. 412 p.
23. Stevenson F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. 3rd ed. New York: Wiley, 2020. 512 p.

ISSN 3030-3907