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 504.06:628.4:549.67:631.879

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕНТОНИТА И САПРОПЕЛЯ

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 исследовано влияние механической и термической активации на физико-химические и сорбционные свойства бентонита Навбахорского месторождения и сапропеля Ташкентской области. Проведён сравнительный анализ изменения удельной поверхности, объёма пор, катионообменной способности, степени аморфизации и дзета-потенциала в зависимости от режимов обработки. Установлено, что механическая активация способствует существенному увеличению удельной поверхности исследуемых материалов вследствие диспергирования частиц и частичного разрушения кристаллической структуры. Для бентонита максимальное значение удельной поверхности достигало 102,31 м²/г, а для сапропеля наблюдалось увеличение почти в три раза по сравнению с исходным состоянием. Термическая обработка приводила к изменению пористой структуры и электрокинетических характеристик материалов, однако при чрезмерных температурах сопровождалась снижением катионообменной способности. Определены оптимальные режимы активации, обеспечивающие наиболее благоприятное сочетание сорбционных характеристик и структурной устойчивости. Показана перспективность совместного использования активированных бентонита и сапропеля для создания эффективных композиционных сорбентов, предназначенных для очистки почв и водных объектов от тяжёлых металлов и других техногенных загрязнителей.

Ключевые слова: бентонит, сапропель, механическая активация, термическая активация, сорбция, катионообменная способность, дзета-потенциал, ремедиация почв.

Abstract. The present study investigates the influence of mechanical and thermal activation on the physicochemical and sorption properties of bentonite from the Navbahor deposit and sapropel from the Tashkent region. A comparative analysis

of changes in specific surface area, pore volume, cation exchange capacity, degree of amorphization, and zeta potential under various treatment conditions was carried out. Mechanical activation was found to significantly increase the specific surface area of both materials due to particle size reduction and partial destruction of the crystal structure. The maximum specific surface area of bentonite reached 102.31 m²/g, while sapropel exhibited an almost threefold increase compared with the initial material. Thermal treatment modified the porous structure and electrokinetic characteristics of the sorbents; however, excessive temperatures resulted in a decrease in cation exchange capacity. Optimal activation parameters providing the best balance between sorption efficiency and structural stability were determined. The results demonstrate the potential of activated bentonite–sapropel composites as environmentally friendly sorbents for the remediation of soils and water contaminated with heavy metals and other anthropogenic pollutants.

Keywords: bentonite, sapropel, mechanical activation, thermal activation, sorption, cation exchange capacity, zeta potential, soil remediation.

Annotatsiya. Mazkur tadqiqotda Navbahor koni bentoniti va Toshkent viloyati sapropelining fizik-kimyoviy hamda sorbsion xossalariga mexanik va termik aktivatsiyaning ta’siri o‘rganildi. Turli ishlov berish rejimlarida solishtirma sirt maydoni, g‘ovaklar hajmi, kation almashinish sig‘imi, amorflanish darajasi va zeta-potensialning o‘zgarishi tahlil qilindi. Aniqlanishicha, mexanik aktivatsiya zarrachalarning maydalanishi va kristall tuzilmaning qisman buzilishi natijasida materiallarning solishtirma sirt maydonini sezilarli darajada oshiradi. Bentonit uchun maksimal solishtirma sirt maydoni 102,31 m²/g ga yetgan bo‘lsa, sapropelda ushbu ko‘rsatkich dastlabki holatga nisbatan qariyb uch barobar ortgan. Termik ishlov berish natijasida materiallarning g‘ovak tuzilishi va elektrokinetik xususiyatlari yaxshilangan, biroq yuqori haroratlarda kation almashinish sig‘imi kamaygan. Sorbsion samaradorlik va strukturaviy barqarorlikning eng maqbul nisbatini ta’minlovchi optimal aktivatsiya rejimlari aniqlandi. Faollashtirilgan bentonit va sapropel asosida og‘ir metallar hamda boshqa texnogen ifloslantiruvchilar bilan zararlangan tuproq va suvlarni tozalash uchun samarali kompozitsion sorbentlar yaratish istiqbollari ko‘rsatildi.

Kalit so‘zlar: bentonit, sapropel, mexanik aktivatsiya, termik aktivatsiya, sorbsiya, kation almashinish sig‘imi, zeta-potensial, tuproq remediatsiyasi.

1. ВВЕДЕНИЕ.

В последние годы загрязнение почв тяжёлыми металлами, нефтепродуктами и другими техногенными поллютантами стало одной из наиболее серьёзных экологических проблем. Эффективным направлением решения данной задачи является применение природных сорбентов, обладающих высокой сорбционной ёмкостью и экологической

ISSN 3030-3907

безопасностью. Среди большого числа природных материалов особый интерес вызывают бентонитовые глины и сапропели: их преимущества заключаются в широком распространении, низкой стоимости, экологической безопасности и способности эффективно связывать загрязняющие вещества различной природы. Современные исследования показывают, что эффективность природных сорбентов определяется не только химическим составом, но и рядом структурных характеристик — удельной поверхностью, пористостью, размером частиц, наличием функциональных групп и величиной катионообменной способности.

Бентонитовые глины относятся к наиболее распространённым природным сорбентам и широко применяются в экологических технологиях, нефтегазовой промышленности, строительстве и сельском хозяйстве. Для накопления бентонитовых глин большое значение имели гидрохимические условия среды накопления [1]. Основным минералом бентонитов является монтмориллонит, структура которого состоит из двух кремнекислородных тетраэдрических слоёв и одного алюмооксигидроксидного октаэдрического слоя, расположенного между ними. Между гидроксильными ионами соседних пакетов существует слабая связь, благодаря чему они способны удерживать большое количество воды и других полярных жидкостей, включая органические, которые, входя в межпакетные пространства, вызывают набухание решётки [7].

По данным [5], удельная поверхность природных монтмориллонитов может достигать 800 м²/г с учётом внутренней поверхности слоёв, что обеспечивает высокую адсорбционную ёмкость по отношению к ионам тяжёлых металлов, органическим красителям и нефтепродуктам. Химическая модификация может улучшать каталитические свойства бентонита [10]. Многие исследователи отмечают, что эффективность бентонитов может быть значительно повышена различными методами активации. В работе [3] показано, что механическое воздействие приводит к разрушению агрегатов частиц и увеличению доступности активных центров сорбции. Аналогичные результаты получены в [9], где установлено увеличение сорбционной ёмкости механически активированных бентонитов на 30–50 % по сравнению с природными образцами. Бентониты Навбахорского месторождения характеризуются высоким содержанием монтмориллонита и значительной катионообменной способностью, что делает их перспективным сырьём для получения сорбентов нового поколения [2, 6].

Физико-химические свойства бентонитов, прежде всего адсорбционные и катионообменные, напрямую зависят от содержания основного породообразующего компонента — монтмориллонита — и

ISSN 3030-3907

особенностей его структуры [4]. Механическая активация является одним из наиболее эффективных способов модификации минерального сырья: в процессе высокоэнергетического измельчения происходит не только уменьшение размеров частиц, но и существенное изменение их структурного состояния. Исследования [8] показали, что интенсивное измельчение вызывает снижение интенсивности характерных дифракционных максимумов монтмориллонита, что свидетельствует о частичном разрушении его кристаллической структуры; подобные изменения сопровождаются ростом реакционной способности материала и улучшением его адсорбционных свойств. Несмотря на значительное количество публикаций по механической активации бентонитов, вопросы влияния параметров обработки на свойства местных бентонитов Узбекистана остаются недостаточно изученными.

Кристаллическая структура монтмориллонита представляет собой взаимосвязь трёх элементов матрицы: силикатного слоя с избыточным отрицательным зарядом, положительно заряженных внеслоевых (обменных) катионов, компенсирующих этот заряд, и молекулярно связанной воды [2, 6]. Термическая обработка является важным методом управления структурой глинистых минералов. Бентонит обладает высокой гидрофильностью и выраженными адсорбционными и катионообменными свойствами [11]. При температурах до 200 °C происходит удаление физически адсорбированной воды; в интервале 200–400 °C удаляется межслоевая вода, что приводит к перестройке пористой структуры; при температурах выше 600 °C происходит разрушение структуры монтмориллонита и резкое снижение сорбционной активности. В работе [12] рассмотрена возможность улучшения адсорбционных свойств бентонитовой глины путём её модификации и активации при различных условиях. Правильно подобранный температурный режим позволяет получить материалы с улучшенными сорбционными характеристиками без значительной потери обменных свойств.

В отличие от бентонита, сапропель представляет собой сложную органоминеральную систему, сформированную в результате многолетнего накопления остатков водных организмов. Главной особенностью сапропеля является высокое содержание гуминовых веществ, способных связывать ионы металлов посредством комплексообразования. По данным [14], содержание гуминовых кислот в сапропелях может достигать 20 % сухой массы; благодаря наличию карбоксильных и фенольных функциональных групп данные соединения обладают высокой способностью к сорбции тяжёлых металлов. В работе [15] установлено, что сапропели способны

ISSN 3030-3907

эффективно извлекать из растворов ионы свинца, кадмия, меди и цинка, причём сорбционная ёмкость существенно зависит от содержания органического вещества и степени его сохранности.

Основную долю сапропеля составляют органические вещества — гуминовые кислоты, фульвокислоты, остатки целлюлозы, фрагменты биомассы (общая доля органики 30–40 %), легкогидролизуемые вещества (10–15 %), ил, минералы и кремнезём (25–35 %), карбонаты (5–15 %), а также биологически активные вещества — витамины, аминокислоты, фитогормоны (1–3 %). Гуминовые кислоты сапропеля действуют как «природные хелатообразователи», образуя устойчивые комплексы с тяжёлыми металлами, что делает его ценным материалом для очистки почв.

Сочетание бентонита и сапропеля представляет особый интерес, поскольку эти материалы обладают взаимодополняющими свойствами: бентонит обеспечивает развитую поверхность, механическую прочность и высокую сорбционную способность, тогда как сапропель является источником гуминовых веществ и биологически активных компонентов. Однако систематические исследования влияния механической и термической активации на свойства таких материалов практически отсутствуют, особенно применительно к природному сырью Узбекистана. Анализ литературных данных [16, 17, 18] показывает, что бентониты и сапропели являются перспективными природными материалами для экологической ремедиации, однако свойства бентонита Навбахорского месторождения и сапропеля Ташкентской области после комплексной активации изучены недостаточно.

Целью работы является сравнительное исследование влияния механической и термической активации на физико-химические и сорбционные свойства бентонита Навбахорского месторождения и сапропеля Ташкентской области. Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей изменения удельной поверхности, катионообменной способности и дзета-потенциала указанных материалов под воздействием механической и термической активации, а также в обосновании возможности создания композиционных сорбентов на их основе.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В качестве объектов исследования выбраны два вида природного сырья местного происхождения: бентонитовая глина Навбахорского месторождения Навоийской области Республики Узбекистан и сапропель пресноводного озера Ташкентской области. Выбор обусловлен их значительными природными запасами, низкой стоимостью добычи и перспективностью применения в технологиях экологической ремедиации.

ISSN 3030-3907

Бентонит Навбахорского месторождения относится к кальциево-магниевому типу и характеризуется высоким содержанием монтмориллонита. Сапропель — органоминеральный донный осадок, сформировавшийся в результате многолетнего накопления остатков водной флоры и фауны.

Нормативные требования к составу сапропелей различных типов согласно ГОСТ Р 54000-2010 приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Нормативные показатели сапропеля (ГОСТ Р 54000-2010)

Наименование показателя	**Норма для сапропеля**				
	Органического	**Органо-глинистого**	**Органо-кремне-земистого**	**Органо-известково-вистого**	**Известково-вого**
Массовая доля сухого вещества, %, не менее	40				
Массовая доля, % на сухое вещество:					
органического вещества, не менее	50	30	15	15	5
азота общего, не менее	1,5	1,0	1,0	0,5	0,1
фосфора общего (P_2O_5), не менее	0,2	0,3	0,4	0,1	0,1
кальция (CaO), не менее	0,1	0,1	0,5	10	20
железа (Fe_2O_3), не более	20	20	10	10	10
серы (SO_3), не более	3,0	3,0	3,0	7,0	7,0
калия общего (K_2O), не менее	0,3	0,3	0,5	0,1	0,1

Химический и биологический состав исследуемого сапропеля представлен на рисунке 1.

ISSN 3030-3907

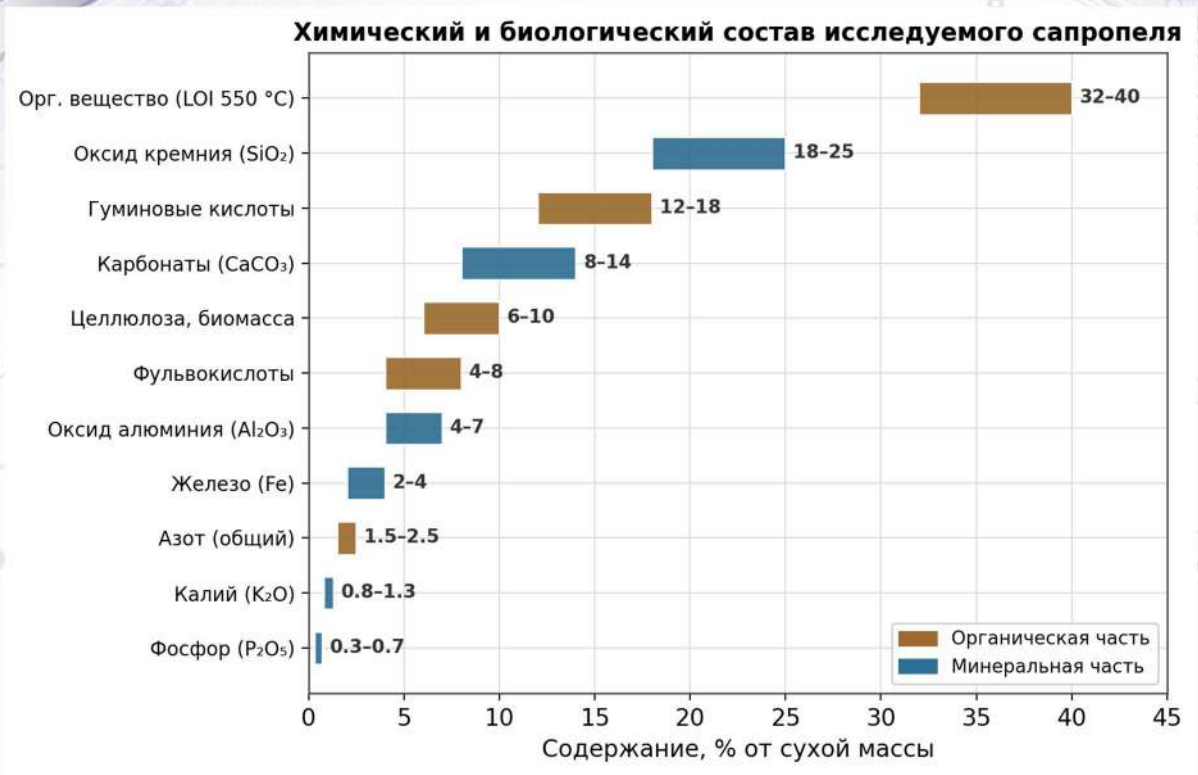


Рисунок 1. Химический и биологический состав исследуемого сапропеля

Сопоставление состава исследуемого сапропеля с требованиями ГОСТ Р 54000-2010 приведено в таблице 2. По содержанию органического вещества, азота, фосфора и калия исследуемый сапропель соответствует требованиям для органо-глинистых сапропелей. Несмотря на относительно низкую удельную поверхность и пористость, наличие большого количества карбоксильных и фенольных функциональных групп делает данный сапропель перспективным сорбентом для связывания ионов тяжёлых металлов и ремедиации загрязнённых почв.

Таблица 2.

Сравнение показателей исследуемого сапропеля с требованиями ГОСТ Р 54000-2010

Показатель	ГОСТ 54000-2010 (органо-глинистый)*	Исследуемый сапропель	Соответствие
Органическое вещество, % сух. в-ва	≥ 30	32–40	Соответствует
Азот общий, %	≥ 1,0	1,5–2,5	Соответствует
Фосфор (P_2O_5), %	≥ 0,3	0,3–0,7	Соответствует
Калий (K_2O), %	≥ 0,3	0,8–1,3	Соответствует
Железо, %	≤ 20 (Fe_2O_3)	2–4 (Fe)	Соответствует

ISSN 3030-3907

Карбонаты ($CaCO_3$), %	Не нормируется	8–14	—
Диоксид кремния (SiO_2), %	Для органо-кремнеземистых форм	18–25	Повышенное
Гуминовые кислоты, %	Не нормируется	12–18	Высокое
Фульвокислоты, %	Не нормируется	4–8	Типично
Целлюлоза и биомасса, %	Не нормируется	6–10	Типично

* для органо-глинистого сапропеля.

Сравнительная характеристика бентонита и сапропеля как природных сорбционных материалов приведена в таблице 3.

Таблица 3.

Сравнительная характеристика бентонита и сапропеля

Показатель	Бентонит	Сапропель
Происхождение	Минеральное сырьё вулканогенно-осадочного происхождения	Органоминеральный донный осадок пресноводных водоёмов
Основной компонент	Монтмориллонит (до 70–80 %)	Гуминовые вещества, органические остатки, минералы
Удельная поверхность, $м^2/г$	30–150	10–30
КОС, мг-экв/100 г	80–150	150–250
Основной механизм сорбции	Ионный обмен, физическая адсорбция	Комплексообразование, хелатирование, ионный обмен
Способность к набуханию	Высокая	Низкая
Содержание орг. вещества	Менее 5 %	30–40 %
Содержание гуминовых кислот	Отсутствуют	12–18 %
Содержание N, P, K	Низкое	Высокое
Экологическая функция	Сорбент, мелиорант, барьерный материал	Сорбент, удобрение, почвоулучшитель

ISSN 3030-3907

Основные преимущества	Высокая поверхность, прочность, стабильность	Высокая КОС, биологически активные вещества
Основные ограничения	Отсутствие органических функциональных групп	Низкая механическая прочность и термостойкость
Роль в композите	Минеральный каркас	Функциональные органические группы

Предполагаемый механизм синергетического взаимодействия бентонита и сапропеля при связывании тяжёлых металлов в почвах показан на рисунке 2.



Рисунок 2. Предполагаемый механизм синергетического взаимодействия бентонита и сапропеля при связывании тяжёлых металлов

После доставки образцов из карьера Навбахор бентонит подвергали предварительной подготовке. Образцы сушили на открытом воздухе при температуре не выше 40 °C в течение 72–96 часов; низкотемпературный режим позволял сохранить природную структуру монтмориллонита и предотвратить преждевременную дегидратацию межслоевого пространства. Высушенный материал измельчали в агатовой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 0,16 мм. Полученный порошок обозначали как образец Б-0 и использовали в качестве контрольного материала.

ISSN 3030-3907

Отбор сапропеля осуществляли с глубины 2–3 м при помощи донного пробоотборника. После транспортировки в лабораторию материал сушили при температуре 105 °C в течение 24 часов до достижения остаточной влажности менее 8 %. Высушенный сапропель измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 0,25 мм. Полученный образец обозначали как С-0.

Удельную поверхность (S(BET)) и параметры пористой структуры определяли методом низкотемпературной адсорбции азота (BET) на анализаторе ASAP 2020 (Micromeritics, США); перед измерениями образцы дегазировали при 120 °C в течение 12 часов. Степень аморфизации рассчитывали по данным рентгенофазового анализа (дифрактометр Rigaku MiniFlex) на основе отношения интегральных интенсивностей кристаллической и аморфной фаз. Катионообменную способность (КОС) определяли аммоний-ацетатным методом. Дзета-потенциал измеряли методом электрофоретической подвижности на приборе Zetasizer Nano ZS (Malvern, Великобритания) с расчётом по уравнению Генри; условия определения приведены в таблице 4. Все измерения проводили не менее чем в трёх параллельных повторностях, результаты представляли в виде среднего арифметического значения ± стандартное отклонение.

Таблица 4.

Условия определения дзета-потенциала образцов

№	Параметр	Значение
1	Метод измерения	Электрофоретическая подвижность
2	Прибор	Zetasizer Nano ZS (Malvern, Великобритания)
3	Принцип метода	Определение скорости движения частиц в электрическом поле с расчётом по уравнению Генри
4	Масса навески образца	50 мг
5	Объём дистиллированной воды	50 мл
6	Концентрация суспензии	1 г/л
7	Корректировка pH	До 7,0 растворами NaOH или HCl
8	Ультразвуковое диспергирование	10 мин
9	Объём пробы для измерения	1 мл
10	Измерительная ячейка	Стандартная кювета для дзета-потенциала

ISSN 3030-3907

11	Температура измерения	25 °C
12	Число параллельных измерений	3
13	Обработка результатов	Расчёт среднего арифметического значения

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.

Удельная поверхность (S(BET)) бентонита является ключевым показателем, определяющим его адсорбционные и каталитические свойства. Зафиксированное значение для природного бентонита Навбахорского месторождения составляет 50,13 м²/г. По мере интенсификации механической обработки поверхность неуклонно возрастает: для образца Б-01 (200 об/мин, 30 мин, BPR 10:1) — до 70,97 м²/г (~42 % роста), при среднем режиме Б-04 (200 об/мин, 30 мин, BPR 30:1, влажный) — до 86,17 м²/г, а при наиболее интенсивном режиме Б-16 (500 об/мин, 90 мин, BPR 30:1, влажный) — до 102,31 м²/г (~104 % роста). Динамика изменения удельной поверхности приведена на рисунке 3.

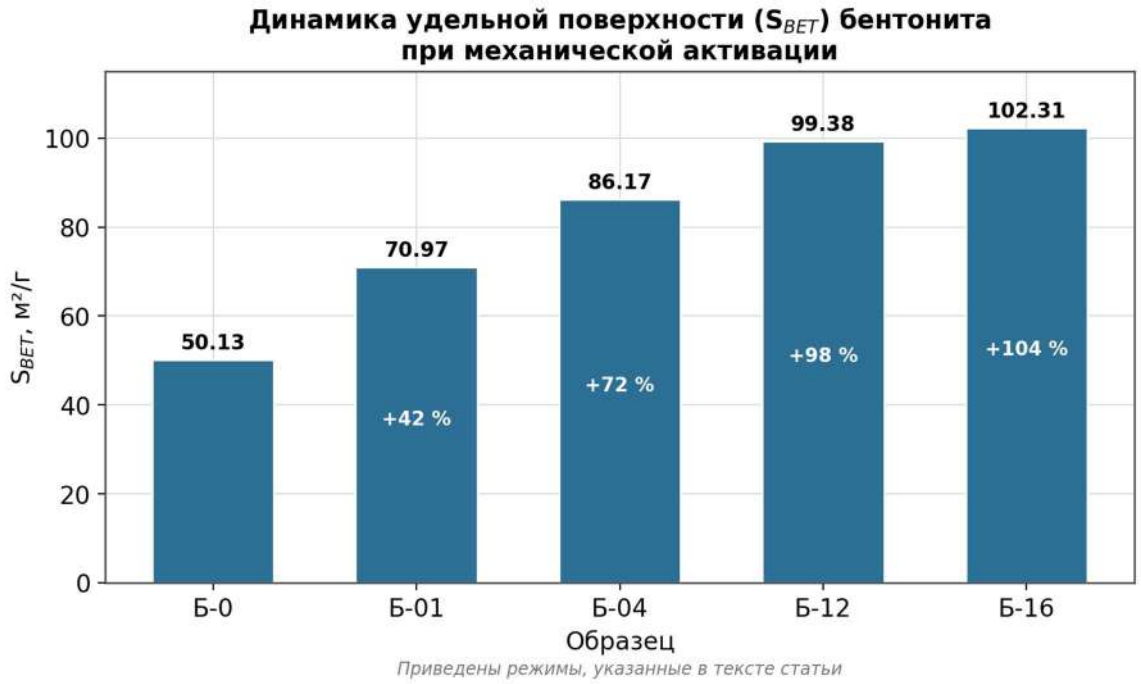


Рисунок 3. Динамика удельной поверхности (S(BET)) бентонита при механической активации

Этот рост объясняется несколькими факторами. Во-первых, механический удар движущихся шаров измельчает частицы бентонита, открывая новые поверхности. Во-вторых, преодолеваются ван-дер-ваальсовы силы между слоями монтмориллонита, и межслоевые пространства становятся доступными для молекул азота. В-третьих, трещины и расширенные граничные поверхности увеличивают удельную поверхность.

ISSN 3030-3907

Катионообменная способность (КОС) — важнейший параметр, количественно выражающий способность материала удерживать на поверхности катионы (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, а также ионы тяжёлых металлов Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+} и др.). КОС природного бентонита составляет 120,30 мг-экв/100 г, что указывает на высокое качество сырья на основе Na-монтмориллонита (для высококачественного Na-бентонита стандартными считаются значения 80–150 мг-экв/100 г). Однако по мере увеличения интенсивности механической обработки КОС последовательно снижается: для Б-01 — 86,17 мг-экв/100 г (потеря 28 %), для Б-12 — 67,92 мг-экв/100 г (потеря 44 %), для Б-16 — 60,83 мг-экв/100 г (потеря 50 %). Снижение КОС объясняется деформацией центров изоморфного замещения в октаэдрических (Al^{3+}) и тетраэдрических (Si^{4+}) позициях монтмориллонита, потерей зарядоудерживающих центров вследствие аморфизации и уменьшением относительной доли активных центров на вновь открытых поверхностях.

Корреляция между S(BET) и КОС образцов бентонита приведена на рисунке 4. Отчётливо видна обратная зависимость между двумя показателями (r = −0,89). Точка Б-12 (99,38 м²/г; 67,92 мг-экв/100 г) располагается на Парето-границе, что означает невозможность дальнейшего увеличения S(BET) без снижения КОС; поэтому данный режим оценивается как оптимальный, тогда как образцы Б-15 и Б-16 остаются ниже этой границы и являются менее благоприятными.

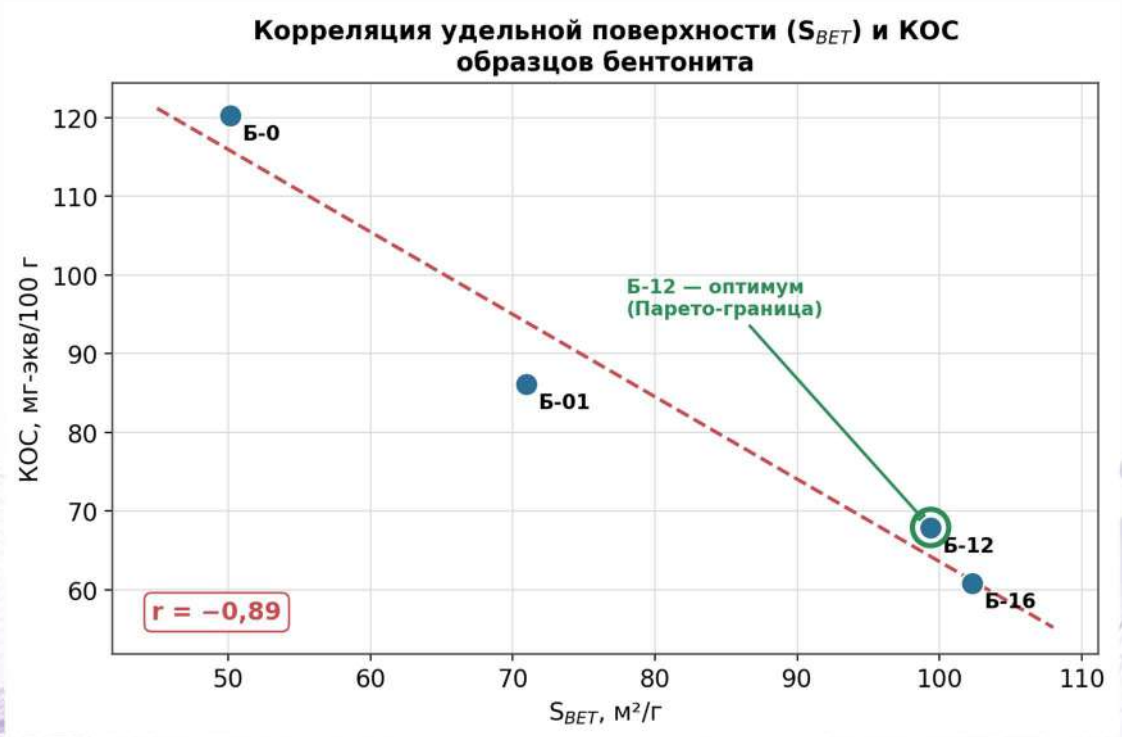


Рисунок 4. Корреляция удельной поверхности (S(BET)) и КОС образцов бентонита

ISSN 3030-3907

На основе совместного анализа всех показателей с учётом их относительных весов оптимальным признан режим Б-12 (500 об/мин, 30 мин, BPR 30:1, влажная обработка), сбалансированно сохраняющий важные параметры: S(BET) = 99,38 м²/г (высокая), объём пор 0,22 см³/г (наивысший), КОС = 67,92 мг-экв/100 г (потеря менее 50 %), |ζ| = 33,5 мВ («хорошо устойчивая» суспензия), аморфизация 36,5 % (активная, на оптимальной границе). Режим Б-11 (сухая обработка) также рекомендуется для промышленного масштаба ввиду более низких энергозатрат.

У природного сапропеля S(BET) составляет всего 15,04 м²/г — в три раза меньше, чем у бентонита. Такому низкому значению есть несколько причин: органические вещества (30–50 %) в гелеобразном состоянии «закрывают» поверхность пор; частицы сапропеля прочно связаны в трёхмерной гелеобразной структуре в виде агломератов; молекулам азота трудно проникать в гидрофильную гелевую структуру. В результате механической обработки S(BET) сапропеля резко возрастает: для С-04 — до 28,89 м²/г, для С-08 — до 35,48 м²/г, для С-12 — до 42,07 м²/г, для С-16 — до 44,10 м²/г, что соответствует росту на 193 % по сравнению с исходным значением (рисунок 5).

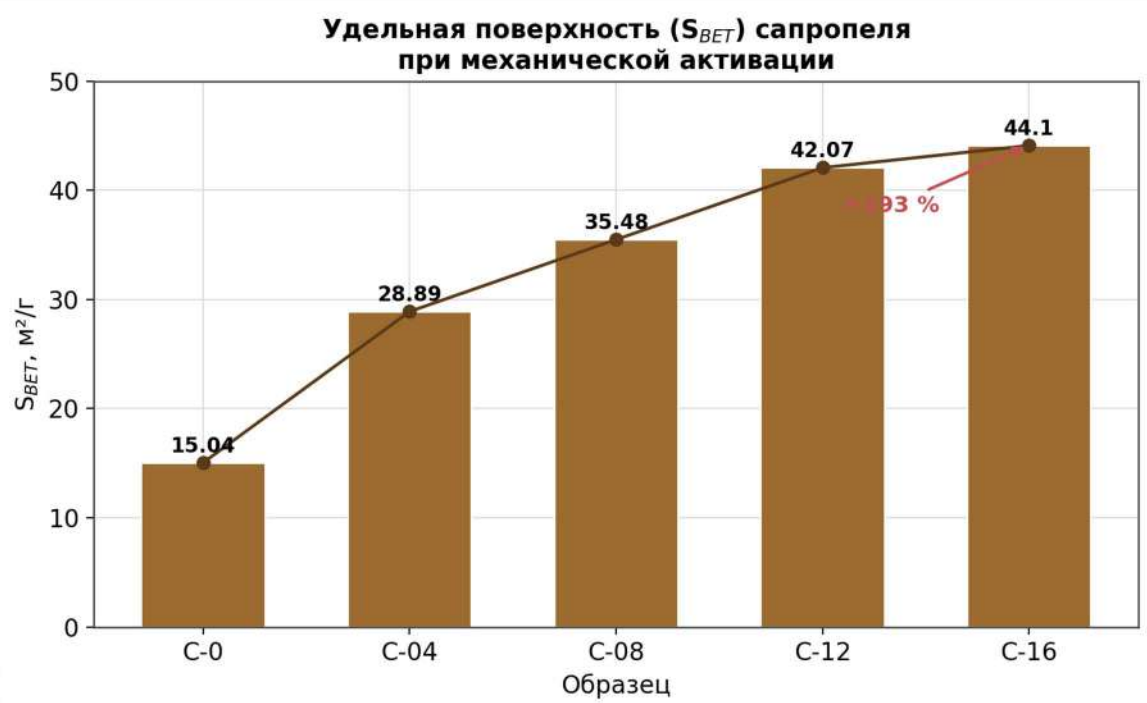


Рисунок 5. Удельная поверхность (S(BET)) сапропеля при механической активации

Термическая обработка бентонита постепенно изменяет структуру монтмориллонита. В проведённых экспериментах максимальная температура была ограничена 500 °C, что соответствует зоне оптимальной дегидратации и начальной дегидроксилации, при которой сохраняется

ISSN 3030-3907

значительная часть катионообменных центров. Дальнейшее повышение температуры (выше 600 °C) приводит к разрушению структуры монтмориллонита и резкому снижению сорбционной активности.

Термическая обработка сапропеля принципиально отличается от обработки бентонита, поскольку сапропель содержит большую долю органических веществ (гуминовые кислоты, остатки целлюлозы, биомассу) — 30–50 %. При 250–350 °C гуминовые кислоты начинают разлагаться, а при 400 °C органические вещества в основном исчезают. Поэтому температура активации была ограничена интервалом 100–250 °C: более высокая температура приводит к потере наиболее ценных компонентов — гуминовых кислот, фитогормонов и других биологически активных веществ.

Результаты измерения дзета-потенциала показали увеличение отрицательного заряда поверхности после активации. Дзета-потенциал природного бентонита составляет −15 мВ, что соответствует сравнительно неустойчивой, склонной к агломерации суспензии. Механическая обработка значительно улучшает этот показатель: для Б-04 — −27,0 мВ, для Б-08 и Б-12 — −33,5 мВ, для Б-16 — −34,0 мВ (увеличение по абсолютному значению в 2,3 раза). Рост абсолютного значения отрицательного дзета-потенциала обусловлен открытием на поверхности частиц новых центров отрицательного заряда (–OH, $–O^-$, $–SiO^-$).

Согласно общепринятой классификации коллоидной устойчивости [27], значения $|\zeta| < 10$ мВ соответствуют быстро агрегирующей суспензии; 10–20 мВ — начальной агрегации; 20–30 мВ — средней устойчивости; 30–40 мВ — хорошей устойчивости; > 40 мВ — превосходной устойчивости. Таким образом, образцы Б-08, Б-12 (−33,5 мВ) и Б-16 (−34,0 мВ) обеспечивают «хорошо устойчивую» коллоидную систему (рисунок 6).

ISSN 3030-3907

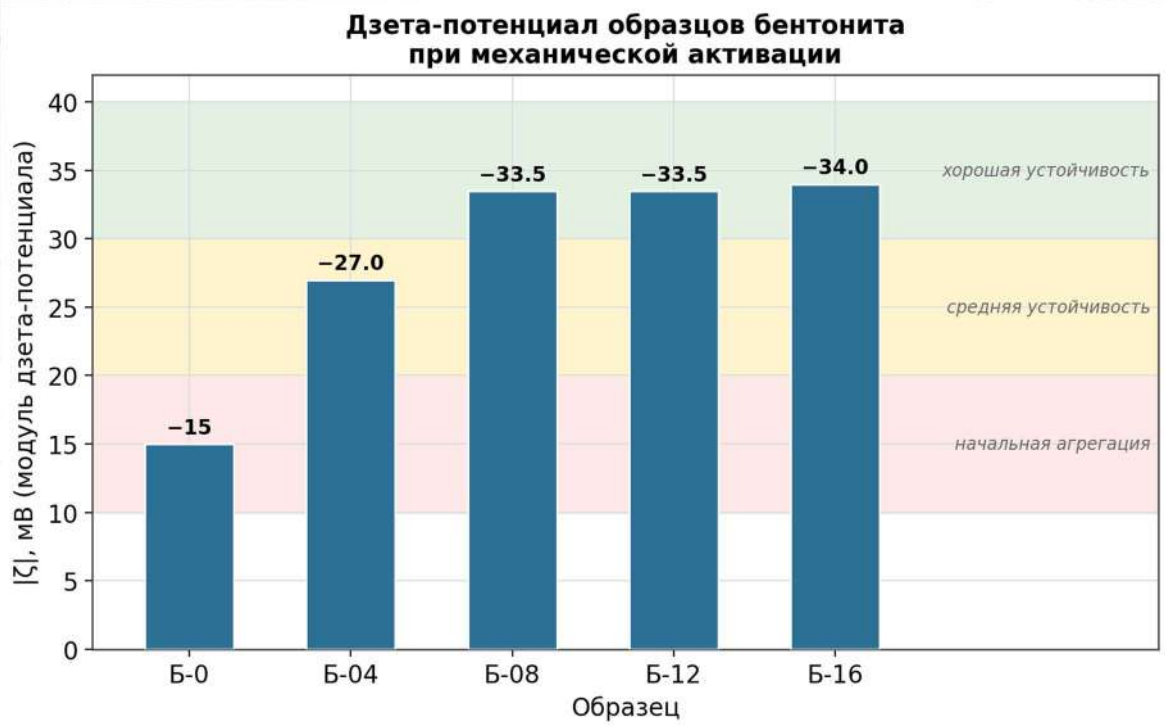


Рисунок 6. Дзета-потенциал образцов бентонита при механической активации

Для исследуемого сапропеля среднее значение дзета-потенциала составило −16 мВ, что указывает на умеренную устойчивость суспензии и наличие поверхностных карбоксильных и фенольных групп гуминовых веществ. Чем выше абсолютное значение дзета-потенциала, тем выше электростатическая стабильность дисперсии и ниже склонность частиц к агрегации.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведённое исследование показало, что механическая и термическая активация являются эффективными методами направленного изменения физико-химических и сорбционных свойств природных материалов. Механическая обработка обеспечивает существенное увеличение удельной поверхности и развитие пористой структуры бентонита и сапропеля, тогда как термическая активация способствует оптимизации структурных и электрокинетических характеристик сорбентов. При этом чрезмерная интенсивность воздействия может приводить к частичной потере катионообменной способности и функциональных групп.

Результаты работы свидетельствуют о высокой перспективности использования активированных бентонита Навбахорского месторождения и сапропеля Ташкентской области в качестве экологически безопасных сорбентов для ремедиации загрязнённых почв и водных экосистем. Особый интерес представляет создание композиционных материалов на основе указанных компонентов, сочетающих высокую механическую прочность,

ISSN 3030-3907

развитую поверхность и наличие активных органических функциональных групп. Практическая значимость исследования заключается в возможности разработки доступных и экономически эффективных технологий очистки окружающей среды с использованием местного природного сырья Узбекистана и стран Центральной Азии.

5. ВЫВОДЫ.

–Механическая активация оказывает наиболее выраженное влияние на структурные характеристики бентонита и сапропеля, способствуя увеличению удельной поверхности, объёма пор и дисперсности частиц.

–Для бентонита максимальное значение удельной поверхности достигло 102,31 м²/г, что более чем вдвое превышает показатель исходного образца; для сапропеля рост удельной поверхности составил около 193 % относительно природного материала.

–Интенсификация механической обработки сопровождается снижением катионообменной способности вследствие частичной аморфизации структуры и разрушения активных центров монтмориллонита.

–Термическая активация способствует развитию пористой структуры и увеличению отрицательного заряда поверхности, однако при температурах выше 400–500 °C для бентонита и 200–250 °C для сапропеля наблюдается снижение катионообменной способности и деградация функциональных групп.

–Наиболее рациональным режимом механической активации бентонита признан режим Б-12 (500 об/мин, 30 мин, BPR 30:1, влажная обработка), обеспечивающий оптимальное соотношение удельной поверхности, пористости, дзета-потенциала и катионообменной способности.

–Активация исследуемых материалов приводит к увеличению абсолютного значения дзета-потенциала до 33–34 мВ, что свидетельствует о высокой коллоидной устойчивости и улучшении дисперсионных свойств сорбентов.

–Совместное использование активированных бентонита и сапропеля объединяет преимущества минеральной матрицы бентонита и функциональных органических групп сапропеля, повышая эффективность сорбции загрязняющих веществ.

–Полученные результаты подтверждают перспективность создания композиционных сорбентов на основе активированных природных материалов для очистки почв и водных объектов от тяжёлых металлов, нефтепродуктов и других техногенных загрязнителей.

ISSN 3030-3907

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирзаев А.У., Чиникулов Х. Глины месторождения Навбахор (Узбекистан) // Литология и полезные ископаемые. 2004. № 1. С. 71–81.
2. Toshirov B.T., Rakhmatov Sh.A. Bentonity Uzbekistana i perspektivy ikh promyshlennogo ispol'zovaniya. Tashkent: Fan, 2004. 256 s.
3. Murray H.H. Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite and Common Clays. Amsterdam: Elsevier, 2007. 180 p.
4. Добрынин И.В. Механоактивационные методы в области производства эффективных бентопорошков для бурения // Нефть. Газ. Новации. 2009. № 10. С. 34–39.
5. Bergaya F., Lagaly G. Handbook of Clay Science. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2019. 1246 p.
6. Сабиров Б.Т. [и др.]. Комплексное исследование бентонитовых глин перспективных месторождений Узбекистана // Universum: технические науки. 2020. № 8(77).
7. Назарова Ф.Ш., Назарова Г.Х., Исламова З.Б. Биологические и физико-химические свойства Азкамарского бентонита и его использование как источника минерального питания // Экономика и социум. 2021. № 4(83). Ч. 2.
8. Lukáč P., Šutka A., Štubňa I. Structural changes in mechanically activated montmorillonite // Applied Clay Science. 2023. Vol. 232. Article 106784.
10. Zhang Y., Li Q., Chen H. Influence of ball milling on physicochemical properties of clay minerals // Powder Technology. 2022. Vol. 406. Article 117590.
11. Castro A., Lima-Junior C.G., França D.B., Martins W.O., Fonseca M.G. Bentonite in sustainable heterogeneous catalysis for organic reactions: An update // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. Issue 2. Article 122010.
12. Жумамурат М.С., Ахметова А.Б. Выбор природных сорбентов для очистки сточных вод // Серия химии и технологии. 2017. № 1. С. 59–66.
13. Huseyin C., Abbas A.M., Abdulrazzak H. Adsorption of heavy metals on bentonite and modified bentonite clay: factors, kinetic and thermodynamic studies: review // Journal of Physics: Conference Series. 2020.
14. ГОСТ Р 54000–2010. Сапропель. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 16 с.
15. Purmalis O., Klavins L., Arbidans L. Ecological quality of freshwater lakes and their management applications in urban territory // Research for Rural Development. 2019. Vol. 2. P. 103–110.

ISSN 3030-3907

16. Stankevica K., Klavins M. Sapropel and its application possibilities in environmental technologies // Environmental and Climate Technologies. 2016. Vol. 17. P. 69–80.
17. Кирейчева Л.В., Глазунова И.В. Природные сорбенты для детоксикации загрязнённых почв // Плодородие. 2008. № 6. С. 44–46.
18. Рахманова Г.Ф., Шаронова Н.Л., Дегтярёва И.А. Влияние наносорбента на процессы биоремедиации нефтезагрязнённой почвы // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 5. С. 148–152.
19. Хлынина Н.Г. Использование сапропеля в качестве сорбента для очистки сточных вод: автореф. дис. … канд. техн. наук. Волгоград, 2008. 24 с.
20. Хлынина Н.Г. Использование сапропеля в качестве сорбента для очистки сточных вод промышленных предприятий // Молодёжь XXI века: шаг в будущее. Благовещенск, 2003. С. 479–480.
21. Комаров В.С., Лыков А.А. Природные гуминовые вещества и их экологическое значение // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 5. С. 16–22.
22. Klavins M., Purmalis O. Properties and utilization of freshwater sapropel: a review // Environmental Reviews. 2019. Vol. 27. No. 3. P. 247–258.
23. Wang S., Peng Y. Natural zeolites and clays as adsorbents in environmental remediation // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 403. Article 126364.
24. FAO. Soil Pollution: A Hidden Reality. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. 148 p.
25. Gupta V.K., Nayak A. Sorption of heavy metals using natural adsorbents: A review // Environmental Engineering Research. 2020. Vol. 25. No. 5. P. 721–736.
26. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of metal ions by clay minerals // Advances in Colloid and Interface Science. 2020. Vol. 277. Article 102107.
27. Zhao Y., Wang J., Xu H. Adsorption behavior of heavy metals on modified bentonite // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 315.
28. Müller R.H., Mäder K., Gohla S. Solid lipid nanoparticles (SLN) for controlled drug delivery – a review of the state of the art // European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. 2000. Vol. 50. No. 1. P. 161–177.

ISSN 3030-3907