



## 300 лет Российской академии наук 300 years of Russian Academy of Sciences

УДК 622.7:533.492.1

DOI: 10.19110/geov.2024.6.4

### Направленные изменения технологических свойств минерального сырья: новые подходы и технологии

К 80-летию со дня рождения Б. А. Осташенко (1944–2008)

О. Б. Котова, Д. А. Шушков, А. В. Понарядов, Л. С. Кочева, И. Н. Размыслов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар  
kotova@geo.komisc.ru

В развитие идей и инноваций доктора геолого-минералогических наук Бориса Андреевича Осташенко в области направленного изменения свойств минералов выполнены исследования алюминийсодержащего сырья и углеродсодержащего сырья растительного происхождения. Показаны основные тенденции развития технологической минералогии, новые подходы к технологиям прогнозной оценки качества минерального сырья, горнопромышленных и других отходов для адаптации композитных материалов путем постконструкционного модифицирования.

**Ключевые слова:** алюминийсодержащее сырье, углеродсодержащее сырье, композитные сорбенты, бокситы, красный шлам, глины, цеолиты

### Targeted modification of the technological properties of mineral raw materials: new approaches and technologies

Commemorating the 80th anniversary of B. A. Ostashchenko (1944–2008)

O. B. Kotova, D. A. Shushkov, A. V. Ponaryadov, L. S. Kocheva, I. N. Razmyslov

Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

To develop the ideas and innovations of Dr. (Geological and Mineralogical Sciences) Boris Andreevich Ostaschenko in the field of targeted modification of the properties of minerals, we studied of aluminum-containing raw materials and carbon-containing raw materials of plant origin. The main trends in the development of technological mineralogy, new approaches to technologies for predictive assessment of the quality of mineral raw materials, mining and other wastes for the adaptation of composite materials through post-structural modification are shown.

**Keywords:** aluminum containing raw materials, carbon-containing raw materials, composite sorbents, bauxite, red mud, clays, zeolites

#### Введение

Технологическая минералогия (ТМ) является одним из основополагающих разделов в концепции развития минерально-сырьевой базы России. Ее формирование и развитие связано с именами крупных ученых, таких как А. И. Гинзбург, В. И. Ревнивцев, В. М. Изоитко и др. Научные труды и разработки доктора геолого-минералогических наук Бориса Андреевича Осташенко и его «кузницы кадров» — несомненно, особая фаза развития ТМ в области технологий переработки минерального сырья, решения экологических проблем горнорудных районов, особенно когда речь идет об упорных рудах, таких как бокситы (Перспективные..., 2010).

Б. А. Осташенко в своих работах выделил крупную научную проблему в рамках ТМ — направленное изменение технологических свойств минералов мелких и тонких классов с целью оптимизации процессов освоения минерального сырья — опираясь на физические методы воздействия как альтернативные химическим\*. Для системы «минерал — среда» были выделены следующие значимые направления:

\* Осташенко Б. А. Направленное изменение технологических свойств минералов: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Сыктывкар, 1998. 44 с.

Ostaschenko B. A. Directed change in the technological properties of minerals. Cand. thesis, Syktyvkar, 1998, 44 p. (in Russian)

**Для цитирования:** Котова О. Б., Шушков Д. А., Понарядов А. В., Кочева Л. С., Размыслов И. Н. Направленные изменения технологических свойств минерального сырья: новые подходы и технологии. К 80-летию юбилею Б. А. Осташенко (1944–2008) // Вестник геонаук. 2024. 6(354). С. 32–39. DOI: 10.19110/geov.2024.6.4

**For citation:** Kotova O. B., Shushkov D. A., Ponaryadov A. V., Kocheva L. S., Razmyslov I. N. Targeted modification of the technological properties of mineral raw materials: new approaches and technologies. Commemorating the 80th anniversary of B. A. Ostashchenko (1944–2008). Vestnik of Geosciences, 2024, 6(354), pp. 32–39, doi: 10.19110/geov.2024.6.4



— роль размерного фактора, позволяющего влиять на процессы обогащения посредством воздействия на среду, а не на сам минерал, регулируя взаимосвязь в системе «минерал — среда» на макро- и микроуровнях;

— установление закономерностей направленного изменения свойств минералов мелкого, тонкого и ультратонкого классов физическими методами на примере исследования широкого спектра минеральных объектов;

— создание концепции повышения качества и комплексного использования минеральных ресурсов для разработки стратегии освоения минерально-сырьевой базы крупных сырьевых регионов РФ на основе комплекса различных экологически чистых технологий обогащения.

Самым главным практическим приложением таких изысканий является вовлечение некондиционного (нетрадиционного) минерального сырья в технологические процессы, повышение извлечения полезных компонентов при обогащении и сортности концентратов, а также улучшение их вскрытия при металлургическом переделе, расширение перечня промышленных продуктов, включая преодоление дефицита стратегических металлов (Cr, Mn, Ti, REE, Be, Al и др.) (Государственный..., 2022). Одним из способов преодоления дефицита стратегических металлов, вызванного низким качеством балансовых руд, является внедрение новых природоподобных технологий (включая рациональные технологические схемы обогащения и технологического передела) (Наумов и др., 2022). По сути, это продолжение работ Б. А. Остащенко и других ученых, которые в основу технологий закладывают природные процессы, привлекая к их управлению достижениями человеческого знания (инновации). В рамках обсуждения природоподобных технологий идут активные дискуссии их форм развития, преимуществ и потенциальных рисков (Ковальчук и др., 2019; Бортников и др., 2023). Развитие природоподобных технологий подразумевает вовлечение (слияние) органического и неорганического сырья в интеграционные процессы прорывных научных направлений: нано-, био-, информационных и др. (Юшкин и др., 1999; Гордиенко и др., 2017; Щемелинина и др., 2023).

Основной целью статьи является развитие идей д. г.-м. н. Б. А. Остащенко в области технологической минералогии (на примере алюминийсодержащего сырья и углеродсодержащего сырья растительного происхождения).

## Материалы и методы

Объекты исследований:

— глины (месторождения бокситов, Средний Тиман): аллиты, каолины и сиаллиты, которые генетически связаны с бокситами и, соответственно, влияют на формирование пород и их технологические свойства;

— сорбенты (или композитные материалы) на основе каолинита и вермикулита, углеродсодержащего сырья растительного происхождения (кора сосны и отходы деревообработки), горнопромышленных отходов (КШ — красные шламы) и биогеосорбенты на основе алюмосиликатов (включая термоактивирован-

ный вермикулит) и активных микроорганизмов-деструкторов.

Химический состав образцов определялся рентгенофлуоресцентным анализом (Horiba MESA 500). Диагностику минералов и изучение количественного минерального состава осуществляли рентгенографическим фазовым анализом (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000). Микроэлементный состав определялся ICP-MS, Agilent 7700х. Пористость и удельная поверхность устанавливались методом BET (анализатор Nova 1200e). Термический анализ (ТГА и ДСК) осуществлялся на термогравиметрическом анализаторе Shimadzu DTG-60H (20—1500 °C) со скоростью нагрева 10 °C/мин.

КШ — промышленные отходы от переработки бокситов Уральского алюминиевого завода (УАЗ). Химический состав КШ определяли с помощью силикатного анализа. Плотность измеряли пикнометрическим методом. Сорбцию радионуклидов проводили по методике, описанной в работе (Котова и др., 2017).

Сорбенты-мелиоранты (СМ) получены из углеродсодержащего сырья растительного происхождения (кора сосны — образец Sb-1 и кородревесные отходы из отвалов длительного хранения, образец Sb-2) методом гидрофобизации вторичным продуктом ЦБП — сульфатным мылом — и осаждением гидрофобизатора сульфатом алюминия  $Al_2(SO_4)_3$ . Сорбционные характеристики полученных образцов испытывали на примере тяжелой нефти Харьягинского месторождения (Республика Коми) и нефти Возейского месторождения (залежь Нижнепермская). В качестве нефтепродуктов использовали смесь «машинное масло М8-Б1 / бензин АИ 95» в соотношении 1 : 3. Для определения характеристик полученных сорбентов использовали эмульсию «вода в нефти» в соотношении 1 : 1 по массе или смесь «машинное масло / бензин» в соотношении 1 : 3. По результатам экспериментов рассчитывали коэффициент поглощения, степень десорбции нефти, степень фиксации (удержания) нефти сорбентом. Удельную площадь поверхности и особенности пористой структуры образцов определяли на автоматизированной системе ASAP 2020MP (Micromeritics, США), предназначенной для измерения характеристик адсорбционной емкости объемным методом с использованием газов (метод низкотемпературной адсорбции азота). Инструментальная погрешность измерений 0.12—0.15 %. Элементный анализ образцов проводили на анализаторе фирмы Hewlett Packard (США). Микрофотографии получали с помощью электронного микроскопа Tesla 500 при рабочем напряжении 60 кВ. Степень увеличения — 3000—30000х.

## Результаты и их обсуждение

Вовлечение в переработку высокодисперсного природного и техногенного сырья стимулировало развитие новых методов прогнозной оценки его качества. Например, изучение явлений в системе «минерал — среда» позволило разработать новые технологии прогнозной оценки качества минерального сырья и горнопромышленных отходов, заключающиеся в интеграции минералогических методов анализа и экспериментальных работ в области структурных, фазовых и химических трансформаций минералов при различ-

ных воздействиях на них в процессах подготовки и обогащения.

*Технологии прогнозной оценки качества минерального сырья и горнопромышленных отходов.* С позиции ТМ прогнозная оценка качества минерального сырья и горнопромышленных отходов предполагает мобилизацию современных методов минералогических исследований для выявления минералогических характеристик (минерального (фазового) состава, в том числе форм нахождения полезного компонента, морфоструктурных особенностей, характера распределения минералов (фаз), их реального состава и строения), определяющих стратегию и тактику их использования (Ozhogina et al., 2017, Пирогов, Ожогина, 2020; Котова и др. 2021).

Бокситоносные отложения Республики Коми представляют собой комплексное сырье для производства глинозема, железа, редкоземельных элементов и т. д. Ранее экспериментальные исследования по обогащению белых бокситов Южного Тимана показали, что имеется принципиальная возможность получить из высокосернистых бокситов малосернистые, что позволяет существенно расширить ресурсный потенциал алюминиевого сырья Республики Коми (рис. 1) (Осташенко, 1996).

Также ранее было высказано предположение о перспективности комплексных месторождений, где помимо бокситов присутствуют золото и теллур в корках выветривания (Вахрушев, 2011). Ряд работ посвящен новым методам выявления минералого-технологических особенностей бокситов и отходам их переработки, а также технологиям направленного изменения их физико-химических свойств (Вахрушев и др., 2009; Razmyslov et al., 2019; Котова и др., 2021). Ввиду ограниченности качественного бокситового сырья и сложной геополитической обстановки страны возникает необходимость расширения перспективных алюминийсодержащих видов сырья (нефелины, каолины, кианиты и др.). Нами исследованы глины, которые являются *алюмосиликатным сырьем и природными пористыми материалами*. Исследование минералогических и физико-химических свойств глин (аллиты, каолины и сиаллиты) представляется актуальным для технологий их переработ-

ки и промышленного применения, например для производства кремнезема, а также огнеупоров, носителей для биогеосорбентов, реакторов, наночастиц, катализаторов, теплоизоляторов и т. д.

Сиаллиты и аллиты отчасти сохраняют плейстоценовую, слоистую текстуру материнских пород, также им присущи коломорфные, однородные и пятнистые текстуры (рис. 2, b, c). Породы преимущественно бурых, светло-бурых цветов с зеленоватым оттенком. Каолины изменяются от светло-серых, розовато-белых до красно-розовых, светло-бурых оттенков за счет примесных минералов железа (рис. 2, a). Структура пород мелкозернистая. Преобладание темноокрашенных разновидностей алюмосиликатного бесщелочного сырья связано с окислительными процессами и преобладанием трехвалентного железа в системе.

Каолины можно рассматривать как бедные руды для производства глинозема (~ 40 %  $Al_2O_3$ , ~ 57 %  $SiO_2$ ), которые тем не менее превосходят по содержанию  $Al_2O_3$  и кремневому модулю нефелиновые. Содержание оксидов железа в каолинах достигает 14 %. Примесь  $TiO_2$  не превышает 1.5 %.

Глины относятся к мезо- и микропористым материалам. Аллиты и сиаллиты обладают более развитой

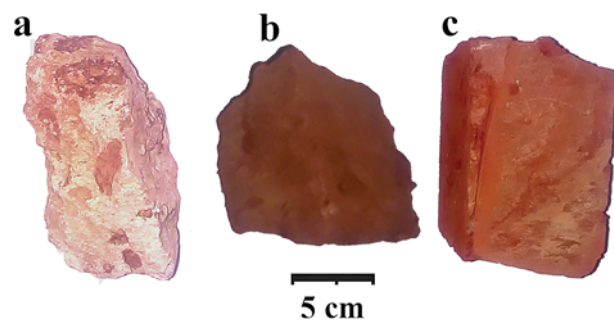


Рис. 2. Алюминийсодержащее сырье месторождений бокситов:

a — каолины, b — сиаллиты, c — аллиты

Fig. 2. Aluminum-bearing raw materials of bauxite deposits:  
a — kaolin, b — sialite, c — allite



Рис. 1. Пузлинско-Тимшерский бокситоносный район Республики Коми. 2003 г.  
Слева направо: Б. А. Осташенко, В. В. Лихачев, В. В. Беляев

Fig. 1. Puzlinsko-Timshersky bauxite-bearing area of the Komi Republic. 2003.  
From left to right: B. A. Ostashchenko, V. V. Likhachev, V. V. Belyaev





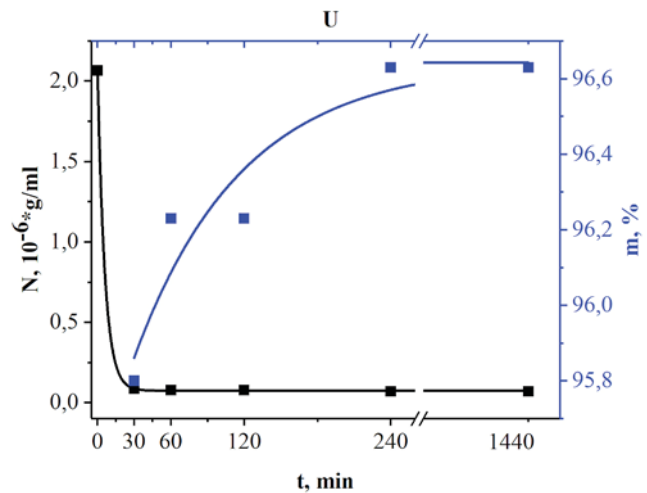
удельной поверхностью в сравнении с каолинами, что определяет их реакционные свойства, способность (активность) адсорбировать вещества. Методом ВЕТ определена удельная поверхность, которая находится в интервале 2–30 м<sup>2</sup>/г. Исследуемые глины (продукты выветривания) сформированы высокодисперсным материалом. Примерно 80 % вещества составляют частицы размером меньше 20 мкм.

По минеральному составу каолины являются ценными глинистыми породами для производства керамики, в том числе огнеупорной. Наиболее перспективным сырьем для промышленности является муллит. Контроль соотношения фаз (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>) на определённых этапах синтеза композита дает возможность управления механическими и другими свойствами матрицы для целевых прототипов промышленных продуктов. Муллитовая фаза фиксируется при t = 1200 °С с появлением кристобалита (Kotova et al., 2022).

Опираясь на свои исследования и публикации коллег, следует отметить, что **техногенные отходы** топливной (золы и золы-уноса ТЭС) (Kotova и др., 2016; Crețescu et al., 2019) и металлургической индустрии (шлаки и т. д.) (Трушко, 2017; Котова и др., 2017) несут серьезные экологические риски. Например, угольная зола уноса генерируется во время сжигания угля на теплоэлектростанциях, и без утилизации этого промышленного отхода экологические проблемы регионов резко возрастают. Утилизация же золы представляет собой преимущество, поскольку эти отходы находятся в большом количестве и это способ их капитализации (например, синтез цеолитов). Минералогическое изучение горнопромышленных отходов, которые сегодня являются практически основным типом техногенного сырья, позволяет провести его комплексную оценку и определить пути дальнейшего использования: в качестве исходного сырья без переработки, например для извлечения ценных металлов; в качестве исходного сырья после дополнительной переработки для получения материальных ресурсов в индустрии; в качестве объекта утилизации.

КШ являются отходами переработки бокситовых руд и неотъемлемой частью проблемы повышения эффективности и комплексности переработки отечественного сырья. По данным РФА, основными железосодержащими минералами КШ являются гематит, гётит, находящиеся в ультрадисперсном состоянии, также идентифицированы минералы алюмосиликатов. Ультрадисперсное состояние вещества дает основание для прогнозирования высоких сорбционных свойств КШ. Действительно, КШ обладают удельной площадью поверхности ~ 19 м<sup>2</sup>/г при плотности ~ 3 г/м<sup>3</sup>. КШ рассматриваются в качестве активных сорбентов в отношении как радионуклидов (урана, радия, тория), так и тяжелых металлов (Cd, Sc и др.) (Котова и др., 2017). Изучена кинетика сорбции КШ по отношению к урану (рис. 3): данный продукт характеризуется высокой сорбционной активностью в отношении U<sub>238</sub>. Так, исследования кинетики сорбции Cd КШ показали, что термическая обработка приводит к увеличению скорости сорбции, удельной поверхности (32.77 м<sup>2</sup>/г) и повышению эффективности сорбции.

*Технологии адаптации композитных материалов путем постконструкционного модифицирования.* Актуальность поиска эффективных технологий адап-



**Рис. 3.** Показатели сорбции урана (черный цвет — концентрация радионуклида в растворе после сорбции, синий — степень извлечения)

**Fig. 3.** Uranium sorption (black — concentration of radionuclide in solution after sorption, blue — extraction degree)

тации композитных материалов путем постконструкционного модифицирования обусловлена тем, что природные сорбенты недостаточно эффективны по своим техническим показателям (устойчивость, прочность, избирательность и др.). Например, каолиновые глины — природные композитные материалы — обладают широким спектром уникальных физико-химических свойств, однако из-за сложности их внутренней структуры и состава синтез композитного продукта с контролируемой кинетикой кристаллизации, текстурой и пористостью затруднен для реализации.

Для формирования определенных физико-химических свойств природных композитных материалов наиболее широко используется термическая активация. При повышении температуры природный композитный материал (цеолиты, глина) подвергаются модифицированию, включая изменение межкристаллической пористости, фазовым трансформациям и т. д., которые повышают их эксплуатационные характеристики. Например, при сравнительной оценке эффективности минеральных носителей в качестве подложки для иммобилизации микроорганизмов для окисления углеводородов при загрязнении почвы и воды термоактивированный вермикулит оказался наиболее эффективным в процессах ремедиации в сравнении с нетермоактивированными алюмосиликатами, рис. 4 (Мязин и др., 2024).

Популярными становятся технологии направленного синтеза (моделирования) композитных материалов на основе алюмосиликатов (Гордиенко и др., 2017). На основе оценки термодинамики реакций в системе [(Al-Si-O-Me)-муллит] нами определен менее энергозатратный способ синтеза муллита. Предложенные технологии контролируют соотношение фаз Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> на этапах синтеза конечного продукта из прекурсора, что в дальнейшем позволит улучшить механические и другие свойства матрицы получаемого материала для целевых прототипов промышленных продуктов (Ponaryadov et al., 2023).

Одним из перспективных направлений повышения эффективности композитных сорбентов может

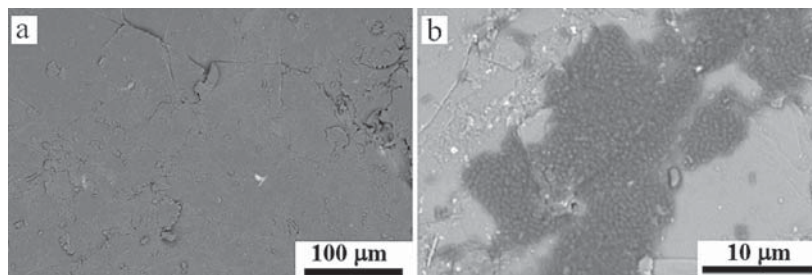


Рис. 4. Термовермикулит без бактерий (а); колонии углеводородокисляющих бактерий на поверхности термовермикулита (б)

Fig. 4. Thermovermiculite without bacteria (a); colonies of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the surface of thermovermiculite (b)

стать иммобилизация на их поверхности микроорганизмов. Конструирование биогеосорбентов является наглядным примером междисциплинарного синергизма, когда подключается принцип комплексирования физико-химических свойств (сорбционной емкости, устойчивости, селективности, экологической совместимости и др.) минеральных систем (глин, цеолитов и др.) в процессах иммобилизации и консервации с преимуществами биотехнологий. Активно продолжаются разработки методов ремедиации активными микроорганизмами-деструкторами с целью повышения эффективности их закрепления (удержания) на минеральных носителях и сохранения жизнеспособности в мероприятиях очистки сточных вод и других водных систем (Мелехина и др., 2016; Мязин и др., 2024).

Наши многолетние минералого-технологические исследования в области алюмосиликатного сырья показывают высокий физико-химический потенциал глин, природных и синтетических цеолитов для иммобилизации микроорганизмов (Щемелинина и др., 2018). В дополнение к их ионообменной способности, большой площади поверхности и пористости они характеризуются доступностью и низкой стоимостью при реализации технологий синтеза промышленных продуктов. Один из ключевых факторов конструирования биогеосорбента — изучение особенностей кристаллохимической (термодинамической) устойчивости и механической прочности алюмосиликатных систем (цеолитов, глин) с целью повышения эффективности закрепления (удержания) клеток микроорганизмов, сохранения их жизнеспособности и активности внеклеточных ферментов путем замены лиофильной сушки на иммобилизацию микроорганизмов на сорбент. В экологически неблагоприятных условиях сорбенты-алюмосиликаты выступают в качестве «базы-транспорта» для бактерий, что позволяет им находиться в жизнеспособном состоянии до 10 лет (Щемелинина и др., 2021).

*Технологии прогнозирования качества углеродсодержащего сырья растительного происхождения.* Различные углеродсодержащие материалы, такие как кора или древесные отходы, а также активированные угли, углеродные волокна, высокоупорядоченные углероды, полученные, например, термохимической конверсией биополимеров, дают информацию о новых стратегиях с точки зрения метода получения и их возможного применения в современных схемах биопереработки.

Кора (древесные отходы) является природным композиционным пористым материалом. Согласно дан-

ным элементного анализа, кора сосны (образец Sb-1) содержит: С — 44.1, О — 45.5, Н — 3.6, N — 0.2 %. Содержание минеральных примесей составляет 6.6 %. Данные свидетельствуют о значительном содержании в химической структуре компонентов коры кислородсодержащих функциональных групп (-ОН, -СО, -СООН и др.), отвечающих за ценные свойства материала, в том числе сорбционные. Кроме того, древесная кора является источником органического кислорода.

На рис. 5, а—d представлены электронные микрофотографии образцов исходной сосновой коры, на которых присутствуют характерные морфологические образования растительной ткани: сосудистые, трахеидные и волокнистые элементы, фрагменты клеточной структуры. Рис. 5, е—h демонстрирует исходный материал после проведения гидрофобизации. Отмечается эффект обволакивания морфологических элементов осевшим гидрофобизатором. Кроме этого, наблюдаются отдельные глобулы гидрофобизатора (рис. 5, f, g). Принципиально важным является факт сохранения пористой структуры растительной ткани (рис. 5, e, h), характерной для исходной коры. С одной стороны, оседание сульфатного мыла на растительных волокнах придает исходному материалу свойства гидрофобности, что является необходимым условием для сбора нефти и нефтепродуктов. С другой стороны, сохранившаяся пористость создает развитую внутреннюю поверхность получаемого продукта, что обеспечивает протекание процесса физической сорбции.

Наиболее важными характеристиками сорбентов любого происхождения являются удельная поверхность и объем микро- и макропор материалов. Для изучения поверхностно-пористых характеристик нами использован метод низкотемпературной адсорбции азота. Как видно на рис. 6, изотермы адсорбции-десорбции  $N_2$  образцов Sb-1 и Sb-2 качественно одинаковы. На основе анализа формы этих изотерм можно сделать вывод, что они относятся к типу IV (а) в соответствии с классификацией IUPAC (Thommes, et al., 2015). Характерной особенностью изотермы IV типа является четко выраженная петля гистерезиса, обусловленная капиллярной конденсацией, которая, как правило, возникает в мезопорах. Следует отметить, что изотермы IV типа наблюдаются для многих промышленных мезопористых адсорбентов. Принимая во внимание положение (почти вертикальное) ветвей адсорбции и десорбции, петли гистерезиса, показанные на рис. 6, следует отнести к типу H1.

В табл. 1 представлены результаты оценки поверхностно-пористых характеристик исследуемых образ-



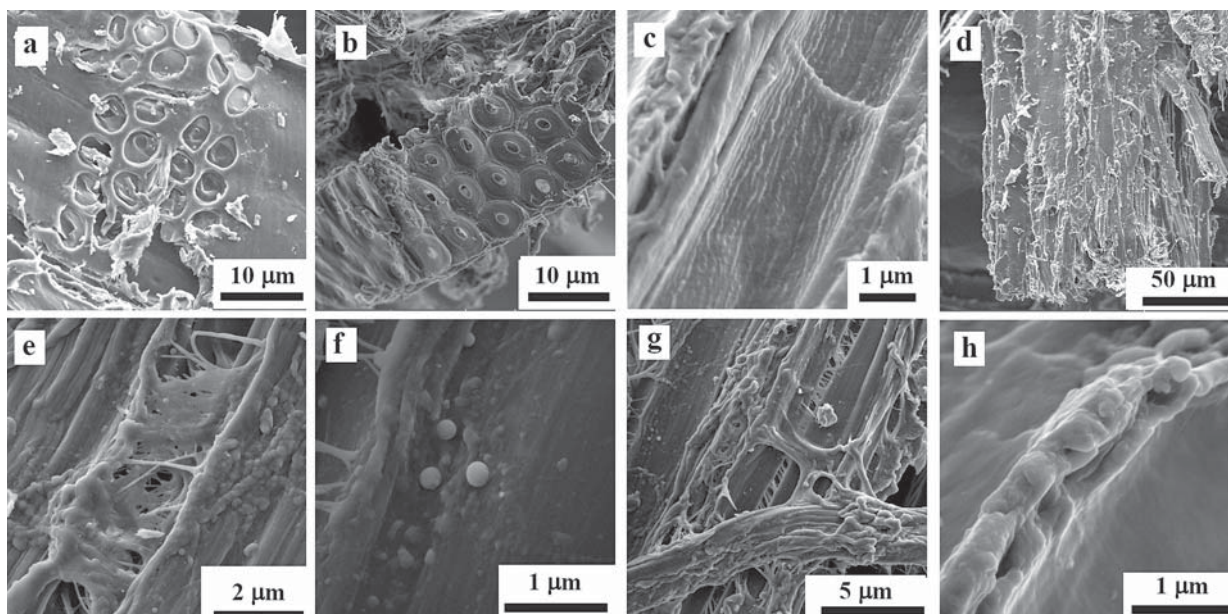


Рис. 5. СЭМ-изображения образцов коры Sb-1 до (а–d) и после (е–h) проведения процесса гидрофобизации  
 Fig. 5. SEM images of Sb-1 bark samples before (a–d) and after (e–h) the hydrophobization process

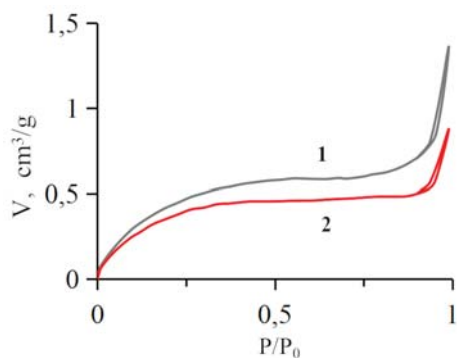


Рис. 6. Изотермы адсорбции азота для образцов нефтесорбентов на основе сосновой коры Sb-1 (1) и кородревесных отходов Sb-2 (2)

Fig. 6. Nitrogen adsorption isotherms for samples of oil adsorbents based on pine bark Sb-1 (1) and bark-wood waste Sb-2 (2)

цов Sb-1 и Sb-2. Согласно полученным результатам, величины удельной площади поверхности, рассчитанные по методу Брунауэра—Эммета—Теллера (SSA-BET), составили 3.1 и 2.3 м<sup>2</sup>/г соответственно (табл. 1). Это сравнительно невысокие показатели, однако для нефтесорбентов более существенным фактором является объем мезопор. Как видно из данных, доля мезопор в суммарном объеме пор достигает 90 %. Данный результат и выявленные особенности изотерм подтверждают вывод о том, что сорбенты на основе коры и кородревесных отходов относятся к мезопористому типу. Это означает, что указанные растительные отходы представляют собой достаточно перспективный ресурс для получения недорогих, но эффективных нефтесорбентов-мелиораторов.

### Заключение

Алюминийсодержащее сырье (природного и техногенного происхождения) отличается сложным мине-

Таблица 1. Структурные характеристики образцов нефтесорбентов на основе коры и кородревесных отходов

Table 1. Structural characteristics of samples of oil sorbents based on bark and bark-wood wastes

Образцы / Samples	Sb-1	Sb-2
УПП по БЭТ, м <sup>2</sup> /г SSA-BET, m <sup>2</sup> /g	3.1	2.3
Суммарный объем пор по БЭТ, см <sup>3</sup> /г Total pore volume according to BET, cm <sup>3</sup> /g	3.9	3.3
Объем мезопор, см <sup>3</sup> /г Mesopore volume, cm <sup>3</sup> /g	3.4	3.1
Объем микропор, см <sup>3</sup> /г Micropore volume, cm <sup>3</sup> /g	1.4	1.8
Средняя ширина пор, нм Average pore width, nm	2.5	2.2

Примечание: УПП — удельная площадь поверхности; БЭТ — метод Брунауэра — Эммета — Тейлера.

ральным составом и текстурно-структурными особенностями с высокой долей дисперсного материала, поэтому для получения достоверной информации о составе и строении необходимо не только оптимизировать комплекс физических методов анализа, но и интегрировать методы моделирования в технологии прогнозной оценки качества для стратегии их применения. Изучены фазовый состав и физико-химические свойства глин (аллиты, каолины и сиаллиты), такие как пористость, удельная поверхность, условия термической стабильности, которые являются основополагающими в технологиях их освоения (добыче, комплексной переработке и т. д.), прогнозируют качество промышленного продукта (композитные сорбенты, огнеупоры, бедное сырье для алюминиевой промышленности).

Дана оценка качества сорбционных композитов радионуклидов на основе КШ. Одним из основных приемов улучшения физико-химических свойств компо-

зитного сорбента являются контролируемые фазовые превращения в процессах синтеза. Показано, что алюмосиликатные сорбенты на основе их структурных особенностей (возможности варьирования сорбционных свойств в зависимости от соотношения Si/Al) представляются перспективной системой для развития экспериментальных основ конструирования алюмосиликатных микро/нанопористых материалов (цеолитов и др.).

Разработанные методы модифицирования сорбционных композитов, основанные на биологических механизмах (активности микробиоты), экономичны и характеризуются высокой селективностью и все чаще рассматриваются как перспективные для очистки водных сред от различного рода поллютантов.

Показана перспективность использования гидрофобизированных углеродсодержащих материалов, синтезированных с использованием природного сырья и техногенных отходов растительного происхождения, в качестве эффективных нефтесорбентов-мелиорантов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Геонаука».

## Литература / References

- Бортников Н. С., Волков А. В., Галямов А. Л., Викентьев И. В., Лаломов А. В., Мурашов К. Ю. Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности России // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 371—386. DOI: 10.31857/S0016777023050039
- Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikentyev I. V., Lalomov A. V., Murashov K. Yu. Problems of development of the mineral resource base of the high-tech industry of Russia. *Geology of ore deposits*. 2023, V. 65, No. 5, pp. 371—386. DOI: 10.31857/S0016777023050039 (in Russian)
- Вахрушев А. В. Первая находка самородного золота и теллура в бокситах Вежаю-Ворыквинского месторождения (Средний Тиман) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. №7. С. 23—25.
- Vakhrushev A. V. The first discovery of native gold and tellurium in bauxites of the Vezhayu-Vorykvinskoye deposit (Middle Timan). *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2011, No. 7, pp. 23—25. (in Russian)
- Вахрушев А. В., Котова О. Б., Любинский И. Ф. Бокситы тиманского региона: новые методы и средства комплексной переработки // Разведка и охрана недр. 2009. № 11. С. 53—57.
- Vakhrushev A. V., Kotova O. B., Lyubinsky I. F. Bauxites of the Timan region: new methods and means of complex processing. *Exploration and protection of subsurface resources*. 2009, No. 11, pp. 53—57. (in Russian)
- Голубева О. Ю., Аликина Ю. А., Бразовская Е. Ю. Наноархитектоника слоистых алюмосиликатов как основа создания новых функциональных материалов для решения актуальных задач медицины и экологии // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 1/ С. 74—80. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.013 (in Russian)
- Golubeva O. Yu. et al. Nanoarchitectonics of layered aluminosilicates as the basis for the creation of new functional materials for solving pressing problems in medicine and ecology. *Proceedings of the Kola Scientific Center RAS. Series: Technical Sciences*. 2023, V. 14, No. 1, pp. 74—80. DOI:10.37614/2949-1215.2023.14.1.013 (in Russian)
- Гордиенко П. С., Шабалин И. А., Ярусова С. Б. Состав, структура и сорбционные свойства наноструктурированных алюмосиликатов // Химическая технология. 2017. Т. 18. С. 2—9.
- Gordienko P. S. et al. Composition, structure and sorption properties of nanostructured aluminosilicates. *Chemical technology*, 2017, V. 18, pp. 2—9. (in Russian)
- Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 455—465. DOI: 10.31857/S0869-5873895455-465
- Kovalchuk M. V., Naraikin O. S., Yatsishina E. B. Nature-like technologies: new opportunities and new challenges. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2019, V. 89. No. 5, pp. 455—465. DOI: 10.31857/S0869-5873895455-465 (in Russian)
- Котова О. Б., Москальчук Л. Н., Шушков Д. А., Леонтьева Т. Г., Баклай А. А. Сорбенты радионуклидов на основе промышленных отходов: физико-химические свойства и перспективы использования // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 4. С. 29—36. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-4-29-36
- Kotova O. B., Moskalchuk L. N., Shushkov D. A., Leontyeva T. G., Baklay A. A. Radionuclide sorbents based on industrial waste: physical and chemical properties and prospects for use. *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2017, No. 4, pp. 29—36 (doi: 10.19110/2221-1381-2017-4-29-36). (in Russian)
- Котова О. Б., Ожогина Е. Г., Шиенг Сан, Размыслов И. Н. Технологическая минералогия как основа комплексного освоения полезных ископаемых. Бокситы Верхне-Шугорского месторождения // Горный журнал. 2021. № 11. С. 21—27. DOI: 10.17580/gzh.2021.11
- Kotova O. B., Ozhogina E. G., Shieng San, Razmyslov I. N. Technological mineralogy as the basis for the integrated development of mineral resources. *Bauxites of the Verkhne-Shchugorsk deposit. Mining Journal*, 2021, No. 11, pp. 21—27. DOI: 10.17580/gzh.2021.11 (in Russian)
- Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества / Н. П. Юшкин, А. М. Асхабов, О. Б. Котова, Б. А. Осташенко и др. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 216 с.
- Micro- and nanodispersed structures of mineral matter. N. P. Yushkin, A. M. Askhabov, O. B. Kotova, B. A. Ostaschenko et al. *Syktvykar: Geoprint*, 1999, 216 p. (in Russian)
- Мелехина Е. Н., Маркарова М. Ю., Анчугова Е. М., Щемелинина Т. Н., Канев В. А. Определение эффективности методов рекультивации загрязнённых нефтью почв // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2016. №3 (27).
- Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Anchugova E. M., Shchemelinina T. N., Kanev V. A. Determination of the effectiveness of methods for reclamation of oil-contaminated soils. *Proc. Komi SC UB RAS*, 2016, No. 3 (27). (in Russian)
- Мязин В. А., Шушков Д. А., Фокина Н. В., Чапоргина А. А., Канивец А. В., Брянцев А. В. Оценка эффективности биогеосорбентов на основе минеральных носителей для очистки нефтезагрязненной почвы // Вестник МГТУ. 2024. № 1. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-1-91-102 (in Russian)





- Myazin V. A., Shushkov D. A., Fokina N. V., Chaporgina A. A., Kanivets A. V., Bryantsev A. V. Evaluation of the effectiveness of biogeosorbents based on mineral carriers for cleaning oil-contaminated soil. *Bulletin of MSTU*, 2024, No. 1. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-1-91-102 (in Russian)
- Наумов В. А., Наумова О. Б., Брюхов В. Н., Голдырев В. В., Голдырев В. Н., Плюснина К. И. Природоподобные технологии на пути освоения техногенно-минеральных образований // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского: сборник научных статей. ПГНИУ / Пермь, 2022. Вып. 25. С. 181–187.
- Naumov V. A., Naumova O. B., Bryukhov V. N., Goldyrev V. V., Goldyrev V. N., Plyusnina K. I. Nature-like technologies on the way to the development of technogenic-mineral formations. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky: collection of scientific articles. PSSRU, Perm, 2022, 25, pp. 181–187. (in Russian)*
- О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году: Государственный доклад. М.: ВИМС, 2022. 623 с.
- Condition and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021: State report. Moscow: VIMS, 2022, 623 p. (in Russian)
- Осташенко Б. А. Бокситы Тимана: проблемы освоения // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 1996. № 6. С. 1–2.
- Ostaschenko B. A. Timan bauxites: problems of development. *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 1996, No. 6, pp. 1–2. (in Russian)
- Перспективные геотехнологии / Под ред. Н. П. Юшкина. СПб.: Наука, 2010. 376 с.
- Promising geotechnologies. Edited by N. P. Yushkin. St. Petersburg: Nauka, 2010, 376 p. (in Russian)
- Пирогов Б. И., Ожогина Е. Г. Принципы и методы технологической минералогии при переработке твердых полезных ископаемых // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2020. №2 (302).
- Pirogov B. I., Ozhogina E. G. Principles and methods of technological mineralogy in the processing of solid minerals. *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2020, No. 2 (302). (in Russian)
- Римкевич В. С. и др. Исследование процессов комплексной переработки небокситовых руд дальневосточного региона России // Тихоокеанская геология. 2006. № 3. С. 66–74.
- Rimkevich V. S. et al. Study of processes of complex processing of non-bauxite ores in the Far Eastern region of Russia. *Pacific Geology*, 2006, No. 3, pp. 66–74. (in Russian)
- Трушко В. Л., Утков В. А., Бажин В. Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 547–553. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.547
- Trushko V. L. Relevance and possibilities of complete processing of red mud from alumina production / V. L. Trushko, V. A. Utkov, V. Yu. Bazhin. *Proc. of the Mining Institute*, 2017, V. 227, pp. 547–553. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.547 (in Russian)
- Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М. Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязнённой почвы // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 246–256. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256> (in Russian)
- Shchemelinina T. N., Anchugova E. M. Integrated biotechnology for cleaning oil-contaminated soil. *Volga Ecological Journal*, 2023, No. 2, pp. 246–256. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>
- Щемелинина Т. Н., Котова О. Б., Анчугова Е. М., Шушков Д. А., Игнатъев Г. В. Цеолитовое и глинистое сырье: экспериментальное моделирование биогосорбентов // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 9. С. 50–57. (doi 10.19110/2221-1381-2018-9-50-57)
- Shchemelinina T. N., Kotova O. B., Anchugova E. M., Shushkov D. A., Ignatiev G. V. Zeolite and clay raw materials: experimental modeling of biogeosorbents. *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2018, No. 9, pp. 50–57. (doi 10.19110/2221-1381-2018-9-50-57) (in Russian)
- Kotova O. B., Shabalin I. L., Kotova E. L. Phase transformations in synthesis technologies and sorption properties of zeolites from coal fly ash. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016. Vol.220, p.526–531. DOI 10.18454/PMI.2016.4.526
- Kotova O. B., Ustyugov V. A., Sun Shiyong, Ponaryadov A. V. Mullite production: phase transformations of kaolinite, thermodynamics of the process // *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. P.129–135. DOI: 10.31897/PMI.2022.43
- Harja M., Kotova O., Ciobanu G., Litu L. New adsorbent materials on the base of ash and lime for lead removal // *Proceedings book: International Symposium “THE ENVIRONMENT AND THE INDUSTRY”*, SIMI 2017, Bucharest, Romania, September, 28–29, 2017 (DOI: <http://doi.org/10.21698/simi.2017.0009>)
- Ozhogina E., Shadrnova I., Chekushina T. (2017). Mineralogical rationale for solving environmental problems of mining regions. *Gornyi Zhurnal*. 105–110. 10.17580/gzh.2017.11.20.
- Ponaryadov, A., Kotova, O., Kotova, E.: Ceramic nanocomposites: control of structural and PTX parameters of the synthesis of mullite from kaolinite using Taguchi experimental design // *Építőanyag — Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 75, No. 4 (2023), 148–153. p. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2023.21>
- Razmyslov I. N., Kotova O. B., Silaev V. I., Rostovtsev V. I., Kiseleva D. V., and Kondratyev S. A., Microphase heterogenization of ferrous bauxites as a result of radiation and heat treatment, *J. Min. Sci.*, 2019, vol. 54, no. 5, pp. 138–153.
- Thommes M., et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*, 87, 9–10, (2015). 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
- Yang T., Wang Y., Sheng L., He C., Sun W., He Q. Enhancing Cd(II) sorption by red mud with heat treatment: Performance and mechanisms of sorption. *J. Environ Manage*. 2020. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109866.
- Crețescu I., et al. Response surface methodology applied for obtaining new binding materials based on fly ash valorisation // *International Conference on Environmental Engineering and Management (ICEEM)*, 18–21 sept. 2019 Iasi, Romania <http://iceem.ro/>