СИНТЕЗ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА Fe/Al -БЕНТОНИТОВ

С.В. Бадмаева, С.Ц. Ханхасаева, М.В. Ухинова

Саяна Васильевна Бадмаева (ORCID 0000-0002-4594-5652)*, Сэсэгма Цыреторовна Ханхасаева (ORCID 0000-0001-9294-2975), Марина Владимировна Ухинова (ORCID 0009-0005-3165-049X)

Лаборатория инженерной экологии, Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, Российская Федерация, 670047

E-mail: sbadm@mail.ru *, stkhan@mail.ru, ukhinova98@mail.ru

Синтезированы Fe/Al-бентониты путем модификации бентонитовой глины полиоксокомплексами железа и алюминия при разных мольных соотношениях железа и алюминия. Определен химический состав и исследованы структура и физико-химические свойства материалов с применением комплекса методов (сканирующая электронная микроскопия с системой энергодисперсионного микроанализа, рентгенофазовый анализ, низкотемпературная адсорбция азота). Модификация бентонитовой глины Fe/Al-комплексами приводила к увеличению содержания железа и алюминия, к увеличению межплоскостного расстояния и удельной поверхности, а также к изменению морфологии частиц. Содержание железа и алюминия в полученных материалах составляло 7,57-14,74% и 10,84 -13,45%, соответственно. Удельная поверхность материалов равнялась 108-137 м²/г. Частицы Fe/Al-бентонитов были представлены в виде рыхлых микроагрегатов различной формы и размеров с наличием большего количества пор по сравнению с бентонитовой глиной. Адсорбционные свойства материалов были охарактеризованы с помощью адсорбции антрахинонового красителя Кислотный ярко-синий, который находит широкое применение в текстильной промышленности и обнаруживается в составе производственных сточных вод. Результаты показали, что адсорбционная емкость модифицированных материалов в отношении красителя превышала адсорбционную емкость бентонитовой глины в 8 - 13 раз, что обусловлено увеличением количества адсорбиионных иентров (Fe/Al)-OH и удельной поверхности. Адсорбция красителя на модифицированных материалах равнялась 10,5 – 11,3 мг/г при рН 6,0 и увеличивалась до 21,8 – 28,3 мг/г при рН 4,0. Полученные материалы могут быть использованы в очистке сточных вод текстильной промышленности от антрахиноновых красителей.

Ключевые слова: бентонитовая глина, модификация, полиоксокомплексы железа и алюминия, адсорбция, антрахиноновый краситель, очистка сточных вод

SYNTHESIS, PHYSICAL-CHEMICAL AND ADSORPTION PROPERTIES OF Fe/Al-BENTONITES

S.V. Badmaeva, S.Ts. Khankhasaeva, M.V. Ukhinova

Sayana V. Badmaeva (ORCID 0000-0002-4594-5652)*, Sesegma Ts. Khankhasaeva (ORCID 0000-0001-9294-2975), Marina V. Ukhinova (ORCID 0009-0005-3165-049X)

Laboratory of Engineering Ecology, Baikal Institute of Nature Management of SB of the RAS, Sakh'yanova st., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia

E-mail: sbadm@mail.ru *, stkhan@mail.ru, ukhinova98@mail.ru

Fe/Al bentonites were synthesized by modifying bentonite clay with iron and aluminum polyoxocomplexes at different iron and aluminum molar ratios. The chemical composition was determined, and the structure and physicochemical properties of the materials were studied using a set of methods (scanning electron microscopy with an energy-dispersive microanalysis system, Xray phase analysis, low-temperature nitrogen adsorption). Modification of bentonite clay with Fe/Al complexes resulted in an increase in the iron and aluminum content, an increase in the interplanar distance and specific surface area, and a change in the morphology of bentonite clay particles. The iron and aluminum content in the obtained materials was 7.57-14.74% and 10.84-13.45%, respectively. The specific surface area of the materials was 108-137 m²/g. The Fe/Al bentonite particles were presented as loose microaggregates of various shapes and sizes with a greater number of pores compared to bentonite clay. The adsorption properties of the materials were tested in the adsorption of anthraquinone dye Acid Bright Blue, which is widely used in the textile industry and is found in industrial wastewater. The results showed that the adsorption capacity of the modified materials for the dye exceeded the adsorption capacity of bentonite clay by 8-13 times, which is due to the increase in the number of adsorption centers (Fe/Al)-OH and the specific surface. The adsorption of the dye on the modified materials was 10.5-11.3 mg/g at pH 6.0 and increased to 21.8-28.3 mg/g at pH 4.0. The obtained materials can be used in the purification of textile industry wastewater from anthraquinone dyes.

Keywords: bentonite clay, modification, iron and aluminum polyoxocomplexes, adsorption, anthraquinone dye, wastewater treatment

Для цитирования:

Бадмаева С.В., Ханхасаева С.Ц., Ухинова М.В. Синтез, физико-химические и адсорбционные свойства Fe/Al -бентонитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 10. С. 87–94. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7209. **For citation:**

Badmaeva S.V., Khankhasaeva S.Ts., Ukhinova M.V. Synthesis, physical-chemical and adsorption properties of Fe/Albentonites. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 10. P. 87–94. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7209.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сохранение чистоты природных водных ресурсов является одной из наиболее актуальных экологических проблем всемирного масштаба. К числу наиболее распространенных загрязнителей природных водоемов относятся синтетические красители, которые негативно влияют на экологическое состояние водных объектов и представляют большую угрозу для здоровья человека и других живых существ [1]. Для защиты окружающей среды и обеспечения возможности повторного использования сточных вод разработаны разные методы очистки воды: адсорбция, электролиз, флотация, осаждение, ионный обмен, мембранная фильтрация, химическое окисление, фотокатализ и др. [2-4]. Многие из этих технологий являются дорогостоящими, особенно при очистке больших объемов сточных вод. Использование некоторых процессов приводит к образованию побочных продуктов, которые часто являются более токсичными, чем исходные загрязнители. Наиболее экономичным из известных методов очистки является процесс адсорбции, который обеспечивает высокую эффективность и селективность при использовании подходящих адсорбентов. Для эффективного удаления загрязняющих веществ из сточных вод необходима разработка адсорбентов, которые имели бы высокую адсорбционную способность и в то же время были бы дешевыми, стабильными, экологически безопасными и доступными материалами. Такими свойствами обладают многие природные материалы, поэтому в настоящее время наблюдается большой интерес к разработке адсорбентов на их основе. Глинистые минералы – это экологически безопасные стабильные природные материалы с большой площадью поверхности и различными функциональными группами. Благодаря этим свойствам глины находят широкое применение в очистке сточных вод, образующихся при производстве красок, косметики, бумаги, фармацевтических препаратов. Кроме того, глинистые минералы можно модифицировать различными методами для повышения их адсорбционной способности в отношении целевых загрязнителей той или иной природы. В зависимости от метода модифицирования адсорбенты на основе глин могут использоваться в адсорбции загрязнителей различных типов. Наиболее часто в очистке воды используются бентонитовые глины, в составе которых в большом количестве присутствует минерал монтмориллонит (Мт). Он относится к группе смектитов типа 2:1 и имеет слоистую структуру, в которой каждый слой имеет толщину около 0,94 нм и состоит из алюмокислородной октаэдрической сетки, находящейся между двумя сетками кремний-кислородных тетраэдров [5-7]. Для глинистых минералов характерно изоморфное замещение Si⁴⁺ на Al³⁺ в тетраэдрических сетках и Al^{3+} на Mg^{2+} и Fe^{2+} в октаэдрических сетках, в результате которого на поверхности глин накапливается отрицательный заряд, компенсирующийся межслоевыми катионами, такими как Ca²⁺ и Na⁺. Высокая емкость катионного обмена глин обусловлена возможностью обмена межслоевых катионов на неорганические и органические катионы. Мт является гидрофильным глинистым минералом и значительно набухает под воздействием воды, что связано с расширением его структуры при поглощении воды. Большая площадь поверхности Мт в сочетании с его заряженной поверхностью и расширяющимся межслоевым пространством обеспечивает эффективную адсорбцию молекул загрязнителей путем различных механизмов [8-10]. Бентонит как широко доступный, экологически безопасный и дешевый материал обычно используется в качестве сорбентов для катионных загрязнителей, включая катионы тяжелых металлов, катионные красители и радионуклиды [11-15]. Низкая эффективность Мт в адсорбции анионных загрязнителей обусловлена его низким сродством к ним из-за отрицательного заряда алюмосиликатных слоев. Для повышения сорбционной способности Мт к анионам применяются различные методы, в том числе и модифицирование неорганическими полиоксокатионами металлов [16-17]. Получаемые композитные материалы характеризуются наличием химически активных поверхностных ОН-групп, большой удельной поверхностью и пористостью вследствие увеличения межслоевых промежутков в частицах бентонита. Выбор дешевых модификаторов, например, полиоксокатионов железа и алюминия, снижает стоимость модифицированных материалов. Улучшенными сорбционными характеристиками могут обладать материалы, получаемые модификацией глин с использованием комбинации полиоксокатионов двух или более различных металлов [18-20]. Однако в настоящее время адсорбционные свойства таких материалов исследованы недостаточно полно для их практического применения в водоочистке.

В данной работе приведены результаты синтеза материалов, полученных модифицированием бентонитовой глины полиоксокатионами двух различных металлов (железа и алюминия), и изучения их структуры и физико-химических свойств, а также результаты тестирования их свойств в адсорбции антрахинонового красителя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Получение Fe/Al-модифицированных бентонитов

Для получения модифицированных глин использовалась очищенная бентонитовая глина (БГ) Тулдонского месторождения (Бурятия) [21]. В данной работе нами был использован известный метод интеркалирования, который используется для получения столбчатых глин (пиллар-глин) [17, 22, 23]. Fe/Al-бентониты получали по методике [24], которая включала в себя: 1) приготовление модифицирующего раствора путем смешивания 0,1 М растворов $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ (Fe/Al = 10%) и 0,2М раствора NaOH для получения соотношения OH/(Al + Fe) = 2,0 и выдерживание его в течение 8 сут. при комнатной температуре для образования Fe/Al-поликосокатионов; 2) добавление модифицирующего раствора к водной суспензии натриевой формы бентонита и выдерживание этой смеси в течение 1 сут. для протекания ионного обмена; 3) отделение твердой фазы от жидкой, промывание водой, высушивание и прокаливание при 350 °C. В данной работе в вышеописанную методику были внесены некоторые изменения: в качестве исходного материала использовалась природная форма бентонита, активированная ультразвуком; для сокращения времени синтеза была исключена стадия получения натриевой формы бентонита; время выдерживания модифицирующего раствора было сокращено до 1 сут. вместо восьми; использовались более высокие соотношения Fe/Al, равные 25 (материал M1), 50 (M2) и 75 (M3) мол. %.

Характеризация материалов

Определение элементного состава материалов проводили на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания) в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Увеличение микроскопа: от 36 до 300000 крат, размер зонда менее 1 мкм. Рентгенофазовый анализ проводили с использованием автоматического дифрактометра Bruker D8 Advance, оснащенного источником излучения Си_{Ка}, 2Ө 2-80° с шагом сканирования 0,02. Удельную поверхность материалов определяли методом низкотемпературной адсорбции азота на установке ТермоСорб LP при 77 К по стандартной процедуре. Точку нулевого заряда определяли методом «дрифта» [25].

Адсорбционные исследования

Для тестирования адсорбционных свойств использовали краситель «Кислотный ярко-синий» (КЯС), С₃₂H₂₈N₂Na₂O₈S₂ (молекулярная масса 678,7 г/моль). По структуре КЯС является представителем антрахиноновых красителей (табл. 1). Данный краситель в водных растворах диссоциирует полностью на органический анион и катионы

натрия, в соответствии со значениями рК_а, приведенными в табл. 1. Благодаря многокольцевой ароматической структуре КЯС обладает высокой стабильностью в широком диапазоне рН (1-13), устойчив к воздействию ультрафиолетового излучения и характеризуется ярким цветом. Он широко используется в текстильной промышленности, а также в производстве бумаги, чернил, тонеров, полимеров, косметических, моющих и чистящих средств. При концентрациях выше 10 мг/л краситель является высокотоксичным для водных организмов [26].

Таблица 1 Структура и значения рКа красителя Table 1. Structure and pKa values of the dye



Адсорбцию проводили при начальной концентрации КЯС 100 мг/л, загрузке сорбентов 1 г/л, значениях pH 4,0 и 6,0 и комнатной температуре. К навеске материала добавляли 10 мл раствора красителя с известной концентрацией, суспензию перемешивали в течение времени, необходимого для достижения равновесия (6 ч), и отбирали пробу, которую центрифугировали и определяли оптическое поглощение раствора КЯС при длине волны, соответствующей максимальному поглощению на спектрофотометре Agilent-8453. Концентрацию красителя определяли по калибровочному графику зависимости оптической плотности от концентрации. Величину удельной адсорбции (q) рассчитывали по формуле:

$$q = \frac{C_0 - C_p}{m} V$$

где, q – количество вещества, адсорбированного на 1 г сорбента, мг/г; C₀ – начальная концентрация раствора КЯС, мг/л; C_p – концентрация раствора КЯС в растворе после адсорбции, мг/л; m – масса сорбента, г; V – объем раствора КЯС, л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойств материалов

Элементные составы бентонитовой глины (БГ) и модифицированных материалов (М1-М3) приведены в табл. 2. Во всех образцах наблюдалось увеличение содержания алюминия и железа соответственно их содержанию в модифицирующих растворах. Содержание алюминия увеличивалось с 10,15% (БГ) до 13,45 (М1), 11,55 (М2) и 10,84% (М3), а содержание железа возрастало от 3,8% (БГ) до 7,57 (М1), 12,13 (М2) и 14,74% (М3). Содержание кальция и натрия уменьшалось на 100%, количество магния на 26,4-28,0%, а содержание ионов калия практически не изменялось. При модифицировании происходит интеркалирование Fe/Al-полиоксокатионов в межслоевое пространство путем замещения обменных катионов бентонита. Количество алюминия, введенного в глину при модифицировании, составляло 0,69-3,30%, железа -3,77-10,94%. Общее количество введенных металлов превышало количество межслоевых обменных катионов бентонита в 6,3-8,6 раз. Это указывает на то, что при модифицировании бентонита происходит полное замещение межслоевых катионов (Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺) на полиоксокатионы алюминия и железа.

Таблица 2

Элементный состав материалов *Table 2*. Elemental composition of materials

CHARLEN	Материалы				
Элементы	БГ	M1	M2	M3	
Si	26,91	24,01	23,31	23,08	
Al	10,15	13,45	11,55	10,84	
Fe	3,80	7,57	12,13	14,74	
Ca	1,48	0	0	0	
Mg	1,82	1,33	1,31	1,34	
Na	0,78	0	0	0	
K	1,14	1,10	1,08	1,02	
0	53,92	52,54	50,62	44,49	

Дифрактограммы образцов БГ, высушенных при 25 и 350 °С, и модифицированных материалов приведены на рис. 1.

На дифрактограмме БГ (25 °C) наблюдалось характерное для Мт отражение при $2\theta = 6,5^{\circ}$ [27], соответствующее базальному расстоянию (d₀₀₁) 13,9 Å. Рефлексы при $2\theta = 19,9^{\circ}, 35,2^{\circ}, 54,7^{\circ},$ 62,3° относились к Мт, рефлексы при $2\theta = 26.7^{\circ},$ 27.3° и $2\theta = 27,6^{\circ}$ относились к примеси кварца и ортоклаза, соответственно [27]. При нагревании глины происходило смещение базального рефлекса от $2\theta = 6,5^{\circ}$ до $2\theta = 9,05^{\circ},$ обусловленное уменьшением межплоскостного расстояния от 13,9Å до 9,8 Å, что является характерным свойством структуры Мт. На дифрактограммах модифицированных материалов сохранялись рефлексы, характерные для Мт, и наблюдалось смещение первого базального рефлекса в область низких углов 2Ө по сравнению с бентонитом. Это соответствовало увеличению межплоскостного расстояния от 9,8Å (БГ) до 10,4 Å (М1), 13,4Å (М2) и 13,1Å (М3). Увеличение межплоскостного расстояния свидетельствует о том, что при термообработке интеркалированные в межслоевое пространство полиоксокомплексы металлов превращаются в стабильные металлоксидные частицы [28-29], которые предотвращают слипание алюмосиликатных слоев и способствуют увеличению удельной поверхности (табл. 3) и формированию слоисто-столбчатой структуры. Расширение рефлексов, соответствующих первому базальному отражению, в модифицированных матералах указывает на расслоение структуры Мт.





Fig. 1. Diffraction patterns of bentonite samples dried at 25 °C (1) and 350 °C (2), and materials M1 (3), M2 (4), M3 (5) (Mt – montmorillonite, Q – quartz, O – orthoclase)

Таблица 3 Физико-химические свойства материалов Table 3 Physical and chemical properties of materials

<i>Tuble 5.</i> Thysical and chemical properties of materials						
Материал	БГ	M1	M2	M3		
S _{уд} , м²/г	50	137	122	108		
pH _{TH3}	5,5	4,8	4,7	4,2		

СЭМ-снимки показали, что модифицирование значительно изменяет морфологию частиц глины (рис. 2a). Частицы БГ представляли собой крупные агрегаты слоистой структуры, состоящие из плотно упакованных пластин. Образцы модифицированных материалов были представлены в виде рыхлых микроагрегатов различной формы и размеров (рис. 2б). Для них была характерна беспорядочная упаковка и большая пористость по сравнению с исходной глиной.



Рис. 2. СЭМ снимки БГ (a) и образца M2 (б) Fig. 2. SEM images bentonite (a) and sample M2 (б)

Адсорбция заряженных частиц на оксидных сорбентах, поверхность которых в водных растворах способна поляризоваться, в значительной мере зависит от эффективного поверхностного заряда, который определяется величиной точки нулевого заряда рНтнз. При рН ниже рНтнз поверхность заряжена положительно, что способствует увеличению адсорбции анионов, при рН выше рН_{ТНЗ} поверхность сорбента заряжается отрицательно и адсорбирует катионы [30-31]. Знание величины рНтнз позволяет регулировать характер взаимодействия между сорбируемыми заряженными частицами и поверхностью адсорбента. Определенные нами значения рН точек нулевого заряда материалов приведены в табл. 3. Модифицирование приводит к изменению эффективного поверхностного заряда, что обусловлено различным содержанием металлов в материалах.

Адсорбционные свойства материалов

Значения удельной адсорбции КЯС на БГ и синтезированных материалах М1-М3 при рН 4,0 и 6,0 представлены на рис. 3.



Рис. 3. Адсорбция красителя на материалах при разных pH ([краситель] 100 мг/л, загрузка сорбента 1 г/л) Fig. 3. Adsorption of the dye on materials at different pH ([dye] is 100 mg/L, sorbent loading is 1 g/L)

Поскольку основными факторами, влияющими на адсорбцию, являются количество обменных центров и удельная поверхность, то для учета совместного влияния данных факторов было определено количество красителя, сорбированное на единице поверхности материалов \mathbf{q}_{s} , по формуле $\mathbf{q}_{s} = \mathbf{q}/\mathbf{S}$, где S – площадь удельной поверхности (табл. 3). Наблюдаемое увеличение адсорбции \mathbf{q}_{s} в ряду: БГ < M1 < M2 < M3, указывает на то, что увеличение адсорбционной емкости материалов обусловлено в основном увеличением количества металлсодержащих центров Fe-OH и Al-OH, способных сорбировать анионы красителя (табл. 4).

Таблица 4 Адсорбция красителя на единице поверхности материалов

Моториол	q₅·10², мг/м²			
материал	pH 4,0	pH 6,0		
БГ	2,0	0,8		
M1	15,9	7,7		
M2	22,1	8,9		
M3	26,2	10,5		

$$pH < pH_{TH3}$$

$$\equiv Me - OH + X^{-} \xrightarrow{H^{+}} \equiv Me - OH_{2}^{+} \dots X^{-}$$

$$pH > pH_{TH3}$$

$$\equiv Me - OH + X^{-} \xrightarrow{OH^{-}} \equiv Me - O^{-} + X^{-} + H_{2}O$$
CxeMa
Scheme

ЛИТЕРАТУРА

1. Madhav S., Ahamad A., Singh A.K., Kushawaha J., Chauhan J.S., Sharma S., Singh P. Water pollutants: sources and impact on the environment and human health. Sensors in water pollutants monitoring: role of material. In: Видно, что адсорбция КЯС на материалах М1-М3 больше в 8-13 раз (pH 4,0) и в 9,6-13 раз (pH 6,0), по сравнению с бентонитом. Уменьшение адсорбции при pH 6,0, по сравнению с адсорбцией при pH 4,0, вызвано тем, что при pH > pH_{TH3}, поверхность материалов заряжается отрицательно, в соответствии со схемой (Me = Fe, Al), что приводит к отталкиванию анионов КЯС при pH 6,0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны дешевые экологически безопасные материалы путем модификации бентонитовой глины полиоксокомплексами железа и алюминия при разных мольных соотношениях железа и алюминия. Показано, что модифицирование бентонитовой глины Fe/Al-комплексами привело к увеличению удельной поверхности и количества адсорбционных центров (Fe-OH и Al-OH). Результаты тестирования адсорбционных свойств полученных материалов показали их высокую эффективность в удалении из водных растворов антрахинонового красителя «Кислотный ярко-синий», который входит в состав сточных вод предприятий текстильной промышленности. Результаты исследования могут в перспективе найти применение в разработке эффективных адсорбентов для процессов водоочистки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук (проект FWSU-2021-0006) с использованием оборудования ЦКП БИП СО РАН (Улан-Удэ).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project FWSU-2021-0006) using the equipment of the Collective Use Center of the Baikal Institute of Nature Management SB RAS (Ulan-Ude).

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

 Madhav S., Ahamad A., Singh A.K., Kushawaha J., Chauhan J.S., Sharma S., Singh P. Water pollutants: sources and impact on the environment and human health. Sensors in water pollutants monitoring: role of material. In: Advanced functional

Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2025. Т. 68. Вып. 10

Advanced functional materials and sensors. Ed. by D. Pooja, P. Kumar, P. Singh, S. Patil. Singapore: Springer. 2020. P. 43-62. DOI: 10.1007/978-981-15-0671-0_4.

- Katheresan V., Kansedo J., Lau S.Y. // J. Environ. Chem. Eng. 2018. V. 6. N 4. P. 4676-4697. DOI: 10.1016/j.jece.2018.06.060.
- 3. Nishat A., Yusuf M., Qadir A., Ezaier Y. // Alex. Eng. J. 2023. V. 76. P. 505-516. DOI: 10.1016/j.aej.2023.06.054.
- Алексеев К.Д., Сизых М.Р., Батоева А.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. Вып. 12. С. 123-130. DOI: 10.6060/ivkkt.20246712.7082.
- Noskov A.V., Alekseeva O.V., Shibaeva V.D., Agafonov A.V. // RSC Adv. 2020. V. 10. N 57. P. 34885–34894. DOI: 10.1039/D0RA06443B.
- Wilson R., Chandran N., Sabu T. // Key Eng. Mater. 2013.
 V. 571. P. 197–213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ KEM.571.197.
- Vinuth M., Bhojya Naik H.S., Vinoda B.M, Pradeepa S.M., Arun Kumar G., Chandra Sekhar K. // J. Environ. Anal. Toxicol. 2016. V. 6. N 2. P.1000355. DOI: 10.4172/2161-0525.1000355.
- Wang C.C., Juang L.C., Lee C.K., Hsu T.C., Lee J.F., Chao H.P. // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 280. N 1. P. 27–35. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.07.009.
- Zhang Q., Jing R., Zhao S., Wu M., Shao Y., Lv F., Liu A., Meng Z. // J. Porous Mater. 2019. V. 26. P. 861–1867. DOI: 10.1007/s10934-019-00782-2.
- Соколова Л.И., Гальченко Д.С. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. Вып. 9. С. 134-140. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7022.
- Ai L., Zhou Y., Jiang J. // Desalination. 2011. V. 266. N 1-3. P. 72-77. DOI: 10.1016/j.cej.2009.08.028.
- Abollino O., Aceto M., Malandrino M., Sarzanini C., Mentasti E. // Water Res. 2003. V. 37. P. 1619–1627. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00524-9.
- Li Z., Chang P., Jiang W., Jean J.S, Hanlie H. // Chem. Eng. J. 2011. V. 168. P. 1193–1200. DOI: 10.1016/j.cej.2011.02.009.
- Джигола Л.А., Садомцева О.С., Шакирова В.В., Каргина К.В., Сютова Е.А., Разговоров П.Б., Нагорнов Р.С. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2018. Т. 61. Вып. 9-10. С. 105-112. DOI: 10.6060/ivkkt.20186109-10.5806a.
- Конькова Т.В., Рысев А.П., Малькова Ю.О. // Журн. физич. химии. 2021. Т. 95. № 1. С. 28–33. DOI: 10.31857/S004445372101012X.
- Ханхасаева С.Ц., Бадмаева С.В. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 23-29. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6438.
- Бутман М.Ф., Овчинников Н.Л., Косенко Н.Ф., Филатова Н.В., Погонин А.Е. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 159-172. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6833j.
- Vicente M.A., Gil A., Bergaya F. Pillared clays and clay minerals. In: Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science. Ed. by F. Bergaya, G. Lagaly. Amsterdam: Elsevier. 2013. Chap. 10.5. P. 523-557. DOI: 10.1016/B978-0-08-098258-8.00017-1.
- Ewis D., Ba-Abbad M.M., Benamor A., El-Naas M.H. // Appl. Clay Sci. 2022. V. 229. 106686. DOI: 10.1016/ j.clay.2022.106686.
- Najafi N., Farajfaed S., Zolgharnian S., Mirak S.H.M., Asasian-Kolur N., Sharifian S. // Proc. Saf. Environ. Prot. 2021. V. 147. P. 8-36. DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.028.
- 21. Ханхасаева С.Ц., Бадмаева С.В., Ухинова М.В. // Сорб. и хром. процессы. 2022. Т. 22. № 4. С. 534-544. DOI: 10.17308/sorp-chrom.2022.22/10609.

materials and sensors. Ed. by D. Pooja, P. Kumar, P. Singh, S. Patil. Singapore: Springer. 2020. P. 43-62. DOI: 10.1007/978-981-15-0671-0_4.

- Katheresan V., Kansedo J., Lau S.Y. // J. Environ. Chem. Eng. 2018. V. 6. N 4. P. 4676-4697. DOI: 10.1016/ j.jece.2018.06.060.
- Nishat A., Yusuf M., Qadir A., Ezaier Y. // Alex. Eng. J. 2023. V. 76. P. 505-516. DOI: 10.1016/j.aej.2023.06.054.
- Alekseev K.D., Sizykh M.R., Batoeva A.A. // Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. J. 2024. V. 67. N 12. P. 123-130 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246712.7082.
- Noskov A.V., Alekseeva O.V., Shibaeva V.D., Agafonov A.V. // RSC Adv. 2020. V. 10. N 57. P. 34885–34894. DOI: 10.1039/D0RA06443B.
- Wilson R., Chandran N., Sabu T. // Key Eng. Mater. 2013. V. 571. P. 197–213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM. 571.197.
- Vinuth M., Bhojya Naik H.S., Vinoda B.M, Pradeepa S.M., Arun Kumar G., Chandra Sekhar K. // J. Environ. Anal. Toxicol. 2016. V. 6. N 2. P.1000355. DOI: 10.4172/ 2161-0525.1000355.
- Wang C.C., Juang L.C., Lee C.K., Hsu T.C., Lee J.F., Chao H.P. // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 280. N 1. P. 27–35. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.07.009.
- Zhang Q., Jing R., Zhao S., Wu M., Shao Y., Lv F., Liu A., Meng Z. // J. Porous Mater. 2019. V. 26. P. 861–1867. DOI: 10.1007/s10934-019-00782-2.
- Sokolova L.I., Galchenko D.S. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. J. 2024. V. 67. N 9. P. 134-140. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7022.
- Ai L., Zhou Y., Jiang J. // Desalination. 2011. V. 266. N 1-3. P. 72-77. DOI: 10.1016/j.cej.2009.08.028.
- Abollino O., Aceto M., Malandrino M., Sarzanini C., Mentasti E. // Water Res. 2003. V. 37. P. 1619–1627. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00524-9.
- Li Z., Chang P., Jiang W., Jean J.S, Hanlie H. // Chem. Eng. J. 2011. V. 168. P. 1193–1200. DOI: 10.1016/j.cej.2011.02.009.
- Dzhigola L.A., Sadomtseva O.S., Shakirova V.V., Kargina K.V., Syutova E.A., Razgovorov P.B., Nagornov R.S. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2018. V. 61. N 9-10. P. 105-112. DOI: 10.6060/ivkkt.20186109-10.5806a.
- Kon'kova T.V., Rysev A.P., Mal'kova Yu.O. // Russ. J. of Phys. Chem. A. 2021. V. 95. N 1. P. 43-49. DOI: 10.31857/S004445372101012X.
- Khankhasaeva S.Ts., Badmaeva S.V. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022.
 V. 65. N 5. P. 23-29. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6438.
- Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Kosenko N.F., Filatova N.V., Pogonin A.E. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 7. P. 159-172. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6833j.
- Vicente M.A., Gil A., Bergaya F. Pillared clays and clay minerals. In: Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science. Ed. by F. Bergaya, G. Lagaly. Amsterdam: Elsevier. 2013. Chap. 10.5. P. 523-557. DOI: 10.1016/B978-0-08-098258-8.00017-1.
- Ewis D., Ba-Abbad M.M., Benamor A., El-Naas M.H. // Appl. Clay Sci. 2022. V. 229. 106686. DOI: 10.1016/j.clay. 2022.106686.
- Najafi N., Farajfaed S., Zolgharnian S., Mirak S.H.M., Asasian-Kolur N., Sharifian S. // Proc. Saf. Environ. Prot. 2021. V. 147. P. 8-36. DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.028.

ChemChemTech. 2025. V. 68. N 10

- С.В. Бадмаева, С.Ц. Ханхасаева, М.В. Ухинова
- Zhao D., Wang G., Yang Y., Guo X., Wang Q., Ren J. // *Clays Clay Miner*. 1993. V. 41. N 3. P. 317–327. DOI: 10.1346/ccmn.1993.0410306.
- Galeano L.-A., Vicente M.Á., Gil A. // Catal. Rev. Sci. Eng. 2014. V. 56. N 3. P. 239-287. DOI: 10.1080/0161 4940.2014.904182.
- Khankhasaeva S.T., Dambueva D.V., Dashinamzhilova E.T., Gil A., Vicente M.A., Timofeeva M.N. // J. Hazard. Mater. 2015. V. 293. P. 21–29. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.038.
- Liu Q., Zhong L.B., Zhao Q.B. Frear C., Zheng Y.M. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. V. 7. P. 14573-14583. DOI: 10.1021/acsami.5b04598.
- Blanco L., Martínez-Rico O., Domínguez Á., González B. // Water Resour. Ind. 2023. V. 29. 100195. DOI: 10.1016/j.wri.2022.100195.
- Database ICDD. The powder diffraction file. International center for diffraction data. Newton Square, Pennsylvania, USA (card 00–003–001 (Mt), card 00–003–0267 (C), card 00–046–1045 (Q)) (2003).
- Gil Bravo A., Vicente M.A. Advances in pillared clays and similar materials: synthesis, characterization and applications. Basel, MDPI. 2020. DOI: 10.3390/books978-3-0365-4827-2.
- Wahyuningsih P., Saviola A.J., Wijaya K. Hutama A.S., Oh W.C., Hauli L. // Reac. Kinet. Mech. Cat. 2024. V. 137. P. 2231–2252. DOI: 10.1007/s11144-024-02659-1.
- Печенюк С.И. // Сорб. и хром. процессы. 2008. Т. 8. Вып. 3. С. 380–429.
- El-Habacha M., Dabagh, A., Lagdali, S. Miyah Y, Mahmoudy G., Sinan F., Chiban M., Iaich S., Zerbet M. // Environ. Sci. Pollut. Res. 2024. V. 31. P. 62065–62079. DOI: 10.1007/s11356-023-27413-3.

- 21. Khankhasaeva S.Ts., Badmaeva S.V., Ukhinova M.V. // Sorb. Khrom. Protsessy. 2022. V. 22. N 4. P. 534-544 (in Russian). DOI: 10.17308/sorp-chrom.2022.22/10609.
- Zhao D., Wang G., Yang Y., Guo X., Wang Q., Ren J. // Clays Clay Miner. 1993. V. 41. N 3. P. 317–327. DOI: 10.1346/ccmn.1993.0410306.
- Galeano L.-A., Vicente M.Á., Gil A. // Catal. Rev. Sci. Eng. 2014. V. 56. N 3. P. 239-287. DOI: 10.1080/0161 4940.2014.904182.
- Khankhasaeva S.T., Dambueva D.V., Dashinamzhilova E.T., Gil A., Vicente M.A., Timofeeva M.N. // J. Hazard. Mater. 2015. V. 293. P. 21–29. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.038.
- Liu Q., Zhong L.B., Zhao Q.B. Frear C., Zheng Y.M. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. V. 7. P. 14573-14583. DOI: 10.1021/acsami.5b04598.
- Blanco L., Martínez-Rico O., Domínguez Á., González B. // Water Resour. Ind. 2023. V. 29. 100195. DOI: 10.1016/ j.wri.2022.100195.
- 27. Database ICDD. The powder diffraction file. International center for diffraction data. Newton Square, Pennsylvania, USA (card 00–003–001 (Mt), card 00–003–0267 (C), card 00–046–1045 (Q)) (2003).
- Gil Bravo A., Vicente M.A. Advances in pillared clays and similar materials: synthesis, characterization and applications. Basel, MDPI. 2020. DOI: 10.3390/books978-3-0365-4827-2.
- Wahyuningsih P., Saviola A.J., Wijaya K. Hutama A.S., Oh W.C., Hauli L. // Reac. Kinet. Mech. Cat. 2024. V. 137. P. 2231–2252. DOI: 10.1007/s11144-024-02659-1.
- Pechenjuk S.I. // Sorb. Khrom. Protsessy. 2008. V. 8. N 3. P. 380-429 (in Russian).
- El-Habacha M., Dabagh, A., Lagdali, S. Miyah Y, Mahmoudy G., Sinan F., Chiban M., Iaich S., Zerbet M. // Environ. Sci. Pollut. Res. 2024. V. 31. P. 62065–62079. DOI: 10.1007/s11356-023-27413-3.

Поступила в редакцию 24.01.2025 Принята к опубликованию 24.04.2025

Received 24.01.2025 Accepted 24.04.2025