ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Сорбция золота на модифицированном сапоните

В.А.Чантурия, **В.Г.Миненко**, **А.Л.Самусев**✉
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. Сорбция золота на модифицированном сапоните // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 49-57. EDN UOUEJM

Аннотация
Теоретически и экспериментально обоснован перспективный метод модификации сапонита (интеркаляция), обеспечивающий его высокую сорбционную емкость по отношению к золоту. Модификация сапонита, выделенного из оборотной воды хвостохранилища обогатительной фабрики, осуществляется путем перемешивания суспензии минерала и ацетона с поверхностно-активным веществом гексадецилтриметиламмония бромид (CTAB), четырехкратной промывкой этанолом и дистиллированной водой, сушкой. Механизм интеркаляции сапонитсодержащего продукта заключается во внедрении в межслоевое пространство положительно заряженных катионов органических соединений путем катионного обмена или адсорбции, что приводит к расширению слоев минерала, резкому смещению дзета-потенциала в положительную сторону. Появление полос в ИК-спектральном интервале 1460-1490 и 2850-2920 $см^{-1}$, относящихся к деформационным и валентным колебаниям группы CH_2 соответственно, подтверждает успешное внедрение молекул CTAB в структуру минерала. В результате исследований максимальной сорбционной емкости модифицированного сапонита установлено, что при исходной концентрации золота 22,6 мг/л полное извлечение достигается уже через 7,5 мин. Максимальная статическая обменная емкость модифицированного сапонита была достигнута после контакта с третьей порцией свежего золотосодержащего раствора и составила 100,5 мг/г. Изотермы сорбции золота соответствуют модели Ленгмюра, основанной на том, что на поверхности модифицированного сапонита образуется мономолекулярный сорбционный слой, и все активные места обладают равной энергией и энтальпией сорбции. При этом кинетические зависимости сорбции наилучшим образом описываются моделью псевдовторого порядка, предполагающей, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции. Установлено, что интеркаляция сапонита гексадецилтриметиламмонием бромида обеспечивает более эффективную сорбцию отрицательно заряженных комплексных ионов золота ($[AuCl_4]^-$). Рассчитанная равновесная статическая обменная емкость модифицированного сапонита составила 92-119 мг/г, экспериментально установленная – 102 мг/г.

Ключевые слова
органическая модификация; сапонит; золото; сорбция; статическая обменная емкость; кинетика; изотермы сорбции

Поступила: 27.03.2025 ***Принята: 02.07.2025*** ***Онлайн: 15.10.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Успешное развитие и модернизация отечественной высокотехнологичной промышленности возможны только при достаточно полном обеспечении стратегическим минеральным сырьем (углеводородами, редкими и редкоземельными, благородными металлами и т.д.). Разработка экологически безопасных технологий для эффективного извлечения ценных элементов из сырья различного происхождения актуальна на всех стадиях переработки [1]. Так, например, извлечение золота из продуктивных растворов выщелачивания достигается следующими основными методами: цементация цинком, при которой комплекс золота восстанавливается до элементарного золота (Au) и впоследствии осаждается путем введения цинкового порошка; экстракция растворителем с использованием ионных жидкостей, которые способны извлекать комплекс золота из раствора в виде металлоорганического соединения; применение активированного угля или ионообменной смолы, обеспечивающих извлечение комплекса золота посредством сорбции [2-4]. Наиболее широкое использование для извлечения золота в промышленности получил активированный уголь, применяемый в процессах «уголь в выщелачивании», «уголь в пульпе» и «уголь в колонне» [5, 6]. Однако сорбция комплексов золота на активированном угле происходит относительно медленно из-за медленной диффузии

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.А.Чантурия, В.Г.Миненко, А.Л.Самусев, 2025

комплексов в микропоры и их способности к закупорке, что приводит к снижению сорбционной емкости (менее 20-30 мг/г) и эффективности разделения [7, 8]. Это обуславливает актуальность поиска альтернативных сорбентов.

Смектиты – группа слоистых силикатных минералов, относящихся к подклассу филлосиликатов (листовых силикатов) и обладающих высокой удельной поверхностью, способностью к набуханию и емкостью катионного обмена [9, 10]. Из-за широкой распространенности и уникальных свойств они используются в различных отраслях промышленности и медицины.

Характерной особенностью кристаллической решетки минералов группы смектитов (монтмориллонит, бейделлит, нонтронит, сапонит, гекторит) является возможность введения большого объема ионов, компенсирующих (нейтрализующих) отрицательный структурный заряд, что обеспечивает возможность направленного регулирования их обменных свойств [11, 12]. Несмотря на изменчивый вещественный состав и текстурно-структурные особенности натуральных глин различного геологического происхождения, отечественные и зарубежные ученые проводят широкий ряд исследований, направленных на модификацию сорбционных свойств смектитов [13-15].

На основе анализа научно-технической литературы по модифицированию глинистых минералов установлено, что для практической реализации направленного улучшения их сорбционной способности чаще всего применяются методы механической, термической и химической (органическими и неорганическими соединениями) обработки, а также их совмещение [16-18].

Интеркаляция (введение, включение) органических катионов-компенсаторов в межслоевое пространство смектитов может происходить путем экстра- и интермицелярного обмена и ионной адсорбции с образованием органоглин. При этом склонные к гидратации органические катионы-компенсаторы преобразуют исходно гидрофильную поверхность минерала (например, сапонита) в гидрофобную [19-21]. Возможность применения обширного круга органических соединений также позволяет регулировать прочностную и деформационную стабильность, оптические, сорбционные и каталитические свойства глинистых пород.

Из множества вариантов производства органоглин (в растворе, в расплаве, *in situ* полимеризация) на практике чаще всего используют более простую интеркаляцию в растворе, позволяющую эффективно и быстро внедрить молекулы полимеров в нанослои смектитов [22-24]. В качестве жидкой фазы применяются вода, растворы спиртов, кетонов, хлороформ и т.д., обеспечивающие интенсивную интеркаляцию большего объема органических катионов-компенсаторов [25].

В данной работе представлены результаты исследований сорбционных свойств по отношению к ионам золота природного сапонита – продукта переработки оборотных вод алмазодобывающего производства, модифицированного путем интеркаляции поверхностно-активного органического соединения.

Методы

В качестве материала исследований использован сапонит алмазоносного месторождения Ломоносовское (Архангельская обл., РФ), модельные и продуктивные золотосодержащие растворы.

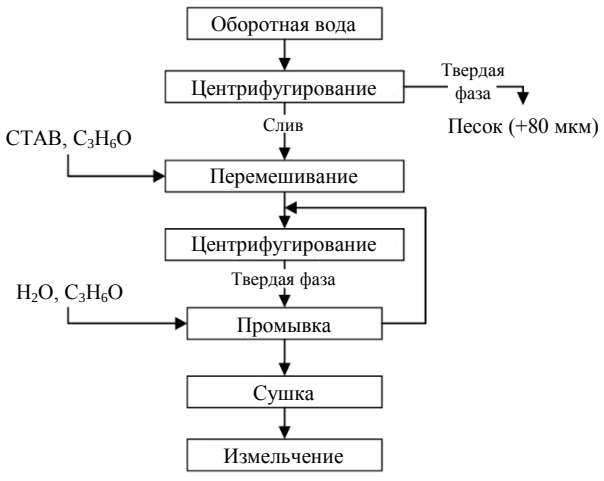


Рис.1. Схема получения сапонита, модифицированного CTAB

В результате переработки алмазосодержащего сырья мелкодисперсный сапонит накапливается в оборотных водах обогатительной фабрики и складируется в хвостохранилище. Для извлечения сапонита из водной суспензии в работе использован метод центрифугирования (ULAB, KHP), позволяющий выделить исходный материал для изготовления сорбентов крупностью менее 80 мкм (тонкая фракция) (рис.1). Содержание сапонита в твердой фазе составляло более 73 % [26, 27]. Широко распространенное в различных областях науки и промышленности (биохимия, молекулярная биология, нанотехнологии, медицина и фармакология, косметика и бытовая химия) катионное поверхностно-активное вещество (ПАВ)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

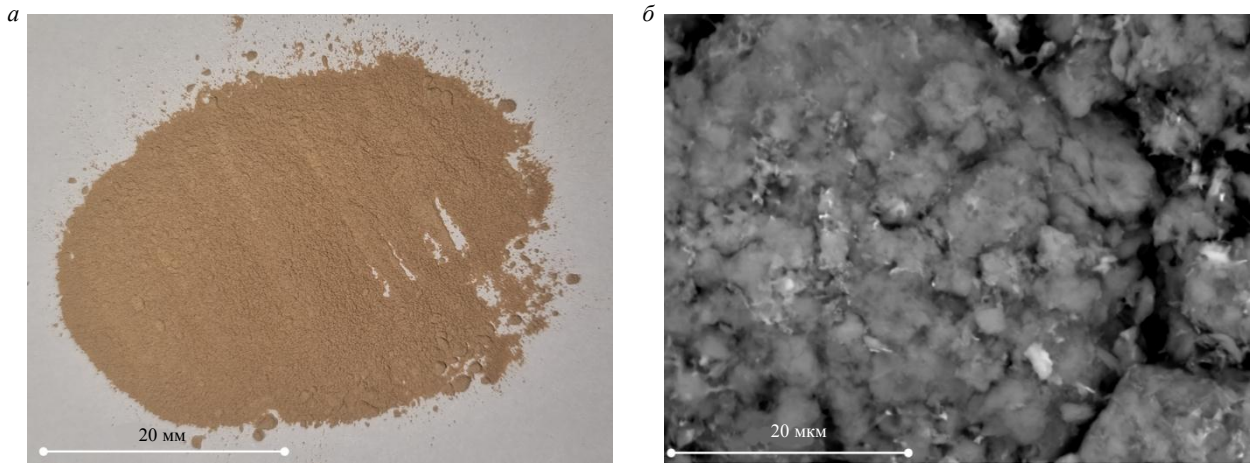


Рис.2. Внешний вид сапонита, модифицированного CTAB: *а* – оптический микроскоп; *б* – электронный микроскоп

гексадецилтриметиламмония бромид $C_{19}H_{42}BrN$ (CTAB) использовался для модификации сорбционных свойств сапонита [28, 29]. В отличие от предыдущих исследований [26] синтез композита осуществлялся без предварительной сушки следующим образом: 300 мл осветленного слива (с содержанием твердого 50 г/л) перемешивали со 150 мл ацетона (50 % к объему сапонита) в течение одного часа. После диспергирования в суспензию равномерно в течение 1 сут вводили водный раствор ПАВ (4,2 % по массе). Перемешивание суспензии проводили на водяной бане (температура 50 °С) при постоянной скорости вращения импеллера верхнеприводной мешалкой 300 об/мин. После завершения интеркаляции ПАВ в структуру сапонита твердую фракцию отделяли на лабораторной центрифуге в течение 5 мин (2500 об/мин). Для удаления ионов Br^- сорбент последовательно промывали в четыре стадии: на первой стадии 200 мл 50 %-ного раствора этилового спирта; на последующих – 200 мл дистиллированной воды. Сушка готового сорбента до постоянной массы осуществлялась при температуре 50-60 °С в лабораторной муфельной печи (ЛОИП, РФ) (рис.2).

В качестве золотосодержащих растворов использованы модельные растворы $HAuCl_4$ с концентрацией золота 10-90 мг/л и продуктивный раствор выщелачивания сульфидного концентрата Васильковского месторождения с концентрацией золота ~ 4,5 мг/л [30]. По данным термодинамического моделирования (программное обеспечение Hydra, Medusa), при pH 2,2 исходного модельного раствора ионы золота находятся в виде комплекса $AuCl_4^-$ (рис.3).

Эксперименты по сорбции золота проводились в течение 7,5-60 мин при дозировке модифицированного сапонита 220-500 мг/л с использованием лабораторного шейкера US-6500 (Ulab, КНР) (рис.4). После завершения сорбции раствор отделяли на лабораторной центрифуге UC-4000 (Ulab, КНР) при ускорении 3500g. Концентрацию золота в растворах после сорбции определяли на УФ-спектрофотометре UV-1700 (Shimadzu, Япония), отградуированном на стандартных растворах при длине волны 313 нм (R^2 = 0,9938) [31, 32].

Равновесная статическая обменная емкость модифицированного сапонита и эффективность извлечения золота рассчитывались согласно следующим формулам [33]:

$$q_e = \frac{V}{m}(C_0 - C_e);$$

$$E = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \cdot 100\ \%,$$

где C_0, C_e – начальная и конечная концентрации золота в растворе соответственно, мг/л; V – объем раствора, мл; m – масса сорбента, г.

Структурно-текстурные особенности и вещественный состав поверхности насыщенного

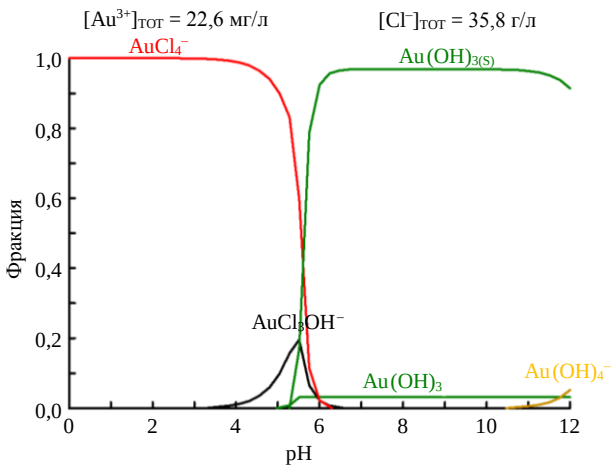


Рис.3. Распределение форм золота от pH

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

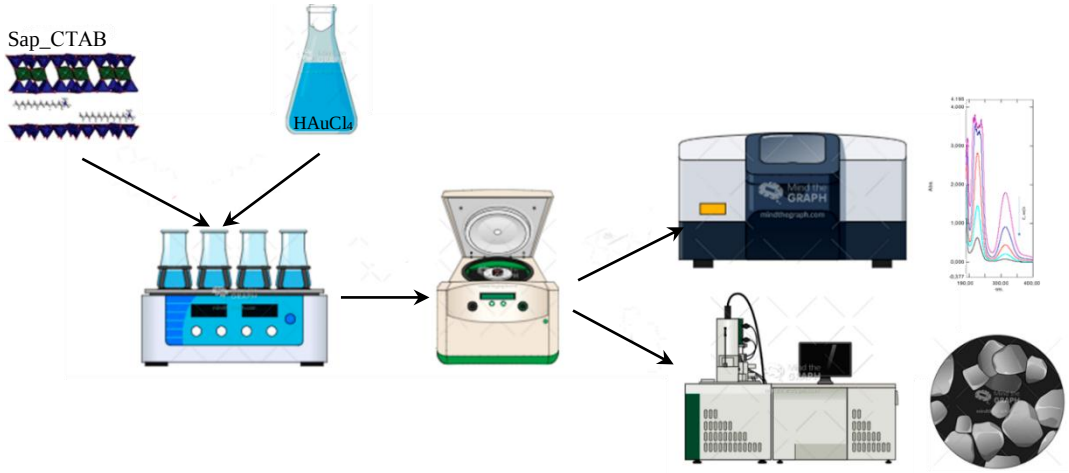


Рис.4. Схема экспериментов по сорбции золота

золотом модифицированного сапонита исследовались на растровом электронном микроскопе LEO (1420VP INCA 350, Zeiss). Межплоскостное расстояние сапонита определяли методом рентгеновской дифрактометрии (XRD 7000, Shimadzu). Дзета-потенциал исходного и модифицированного сапонитов исследовался в дистиллированной воде (pH 6,5) на навесках массой 0,5 г после предварительного ультразвукового диспергирования с использованием анализатора Nanosizer Zeta Pro (919S, Opptronix). ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье осуществлялась с использованием спектрометра IR-Affinity (Shimadzu). Результаты обрабатывались с применением методов математической статистики, программ OriginPro 2018, Microsoft Excel.

Обсуждение результатов

Замещение Si^{4+} на Al^{3+} и Fe^{3+} в тетраэдрическом листе и частичная замена Fe^{3+} и Al^{3+} на Fe^{2+} и Mg^{2+} в октаэдрическом листе обосновывает отрицательный дзета-потенциал (–41,9 мВ) исходного природного сапонита. В результате интеркаляции CTAB алкиламмониевые катионы внедряются и абсорбируются на поверхности и в межплоскостном пространстве, нейтрализуя отрицательный заряд; дзета-потенциал сапонита резко смещается в положительную сторону до +32,5 мВ, что увеличивает электростатическое притяжение и способствует эффективной сорбции анионов [34]. По данным рентгенофазового анализа, после модификации межплоскостное расстояние сапонита увеличивается в 1,45 раза с 14,96 до 21,74 Å, что подтверждает успешное внедрение молекул CTAB в структуру минерала [35, 36].

В ИК-спектрах модифицированного сапонита (рис.5, *а*) идентифицировано появление полос в спектральном интервале 1460-1490 и 2850-2920 $см^{-1}$ (рис.5, *б*), относящихся к деформационным и валентным колебаниям группы CH_2 соответственно [37, 38].

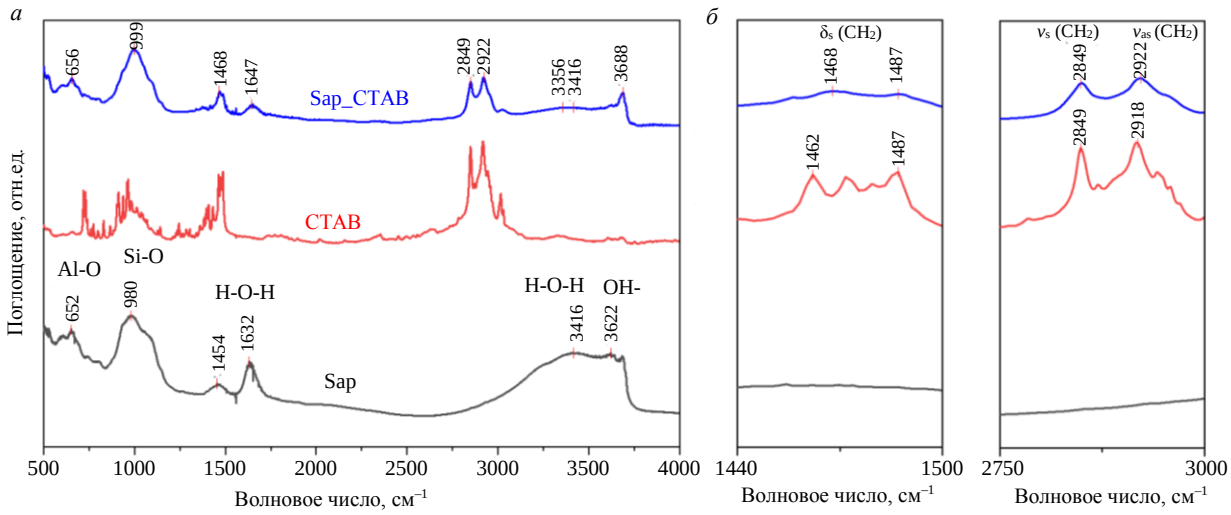


Рис.5. ИК-спектры исходного сапонита (нижний спектр), CTAB (средний спектр) и сапонита после модификации (верхний спектр)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В табл.1 представлены результаты исследования максимальной сорбционной емкости модифицированного сапонита, единичная навеска сорбента последовательно контактировала с тремя порциями модельного раствора (каждая объемом 200 мл) с концентрацией золота 22,6 мг/л. Установлено, что при контакте с первой порцией раствора полное извлечение золота достигается уже через 7,5 мин. Максимальная статическая обменная емкость модифицированного сапонита была достигнута после контакта с третьей порцией свежего золотосодержащего раствора и составила 100,5 мг/г. В результате аналогичных исследований установлено, что СОЕ исходного (не модифицированного) сапонита составляет всего 18,8 мг/г при извлечении золота менее 58 %.

Таблица 1

Результаты сорбции золота на модифицированном сапоните (*C*[Sap_CTAB] = 500 мг/л; *C*[Au] = 22,6 мг/л; *T* = 25 °C)

Параметр	Объем модельного раствора, мл							
	200		+200 (400)			+200 (600)		
t, мин	0,0	7,5	7,5	15,0	30,0	7,5	15,0	30,0
C, мг/л	22,6	0,0	4,5	2,5	0,0	18,2	17,3	17,3
Σ*E*, %	0,0	100,0	80,1	88,6	100,0	19,3	23,4	23,4
q_e, мг/г	0,0	45,2	36,2	3,9	4,7	8,7	1,8	0,0
Σq_e, мг/г	0,0	45,2	81,4	85,3	89,9	98,7	100,5	100,5

На рис.6 представлены результаты исследований сорбционных свойств модифицированного сапонита в зависимости от исходной концентрации золота и продолжительности сорбции. Установлено, что максимальная СОЕ модифицированного CTAB сапонита по отношению к золоту составляет 91,8-102,4 мг/г.

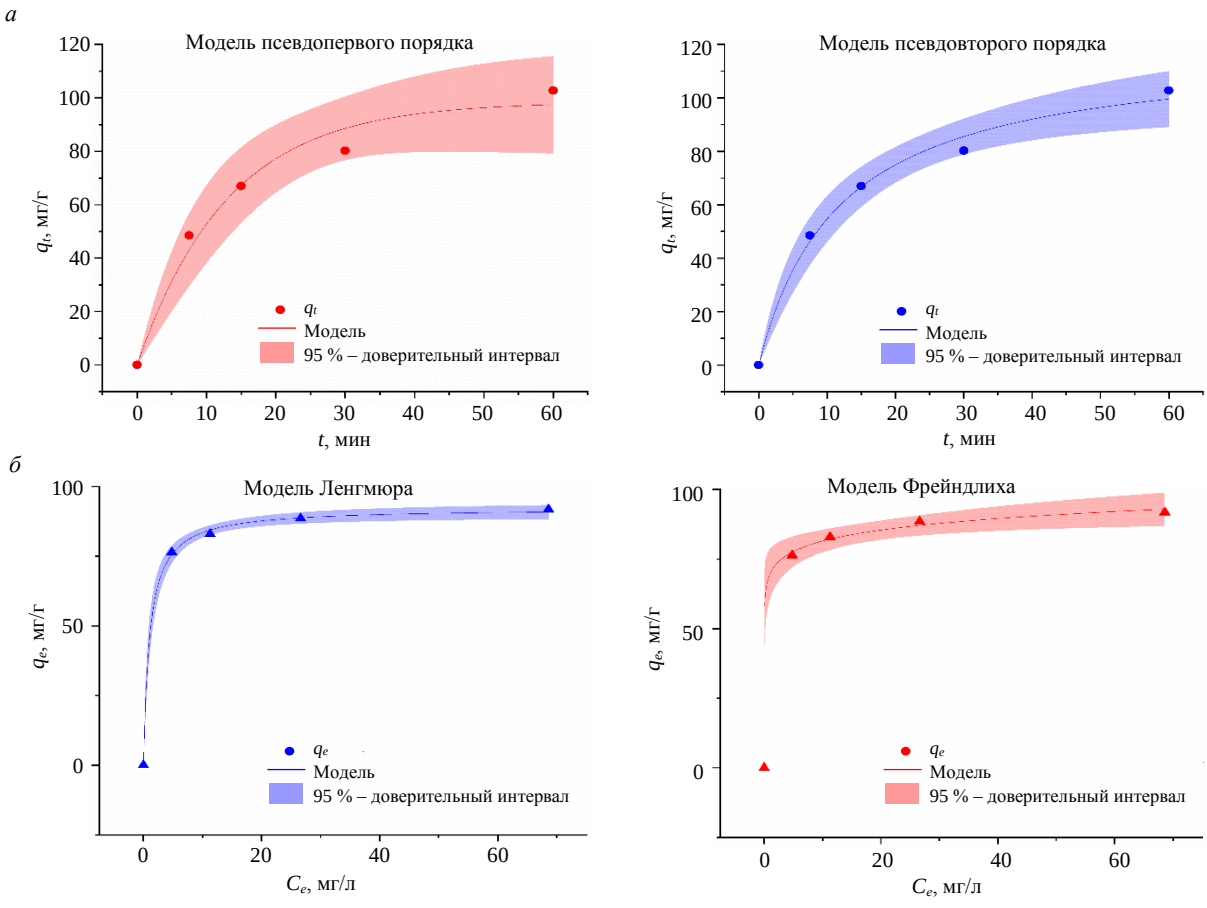


Рис.6. Модели кинетики сорбции (*C*[Au] = 22,6 мг/л; *C*[Sap_CTAB] = 220 мг/л; *T* = 25 °C; *t* = 60 мин) (*а*) и изотермы сорбции (*C*[Sap] = 83-226 мг/л; *T* = 25 °C; *t* = 60 мин) (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

При адаптировании экспериментальных данных к различным кинетическим моделям установлено, что сорбция Au на сапоните соответствует модели псевдовторого порядка (R^2 = 0,99284), предполагающей, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции [39, 40], а максимальная сорбционная емкость достигает 119,1±6,7 мг/г (рис.6, *а*, табл.2).

Анализ изотерм сорбции выявил соответствие экспериментальных данных модели Ленгмюра с максимальной адсорбционной способностью 92,3±0,9 мг/г (рис.6, *б*, табл.3) основанной на том, что на поверхности сапонита образуется мономолекулярный сорбционный слой и все активные места обладают равной энергией и энтальпией сорбции [41-43].

Таблица 2

Параметры кинетики адсорбции Au на модифицированном сапоните

Модель псевдопервого порядка $q_t = q_e\left(1-e^{-k_1 t}\right)$			Модель псевдовторого порядка $q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{q_e k_2 + 1}$		
k_1, мин$^{-1}$	q_e, мг/г	R^2	k_2, г·мг$^{-1}$·мин$^{-1}$	q_e, мг/г	R^2
$7{,}7\cdot10^{-2}$±$1{,}5\cdot10^{-2}$	98,4±6,4	0,97876	$7{,}1\cdot10^{-4}$±$1{,}6\cdot10^{-4}$	119,1±6,7	0,99284

Примечание: k_1, k_2 – константы скоростей.

Таблица 3

Параметры изотерм адсорбции Au на модифицированном сапоните

Модель Ленгмюра $q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$			Модель Фрейндлиха $q_e = K_F C_e^{1/n_F}$		
b, л/мг	q_{max}, мг/г	R^2	n_F	K_F, (мг/г)(л/мг)$^{-n}$	R^2
0,95±0,1	92,3±0,9	0,9994	0,068±0,009	69,7±2,1	0,96265

Примечание: b – адсорбционный коэффициент; K_F – константа уравнения Фрейндлиха; n_F – безразмерный коэффициент.

Данные об эффективной сорбции золота модифицированным сапонитом подтверждены анализом морфологии и химического состава поверхности образцов после сорбции (рис.7). На поверхности сапонита после сорбции выявлены различные по крупности и содержанию золота новообразования: единичные крупные агрегаты (рис.7, *г*) с содержанием Au 8,5-10,5 % и отдельные микровключения (рис.7, *б*) с содержанием Au 3,5-8,5 %. При этом элементный анализ областей поверхности, не занятых новообразованными фазами, также выявил наличие небольшого количества золота (от 0,5 до 3,5 %) (рис.7, *а*).

Таким образом, с использованием современных физических и физико-химических методов анализа в работе подтверждена возможность эффективной модификации сорбционных свойств сапонита путем интеркаляции катионного ПАВ гексадецилтриметиламмонием бромида. В результате проведенных исследований кинетики и изотерм сорбции, морфологии и элементного состава модифицированного сапонита установлена принципиальная возможность получения на его основе эффективных сорбентов золотосодержащих комплексов, обеспечивающая как высокий уровень извлечения золота, так и повышенные сорбционные свойства – более 100 мг/г.

В табл.4 представлены результаты предварительных исследований сорбционных свойств модифицированного CTAB сапонита на реальных растворах гипохлоритного выщелачивания сульфидного концентрата обогатительной фабрики «Altyntau Kokshetau» (бывший Васильковский горно-обогатительный комбинат) с концентрацией золота 4,5 мг/л (шесть порций реального раствора, каждая объемом 200 мл). Как и в случае с модельными растворами, максимальная сорбция ионов золота наблюдалась в первые 10-30 мин, при этом максимальная статическая обменная емкость достигала 75 мг/г.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

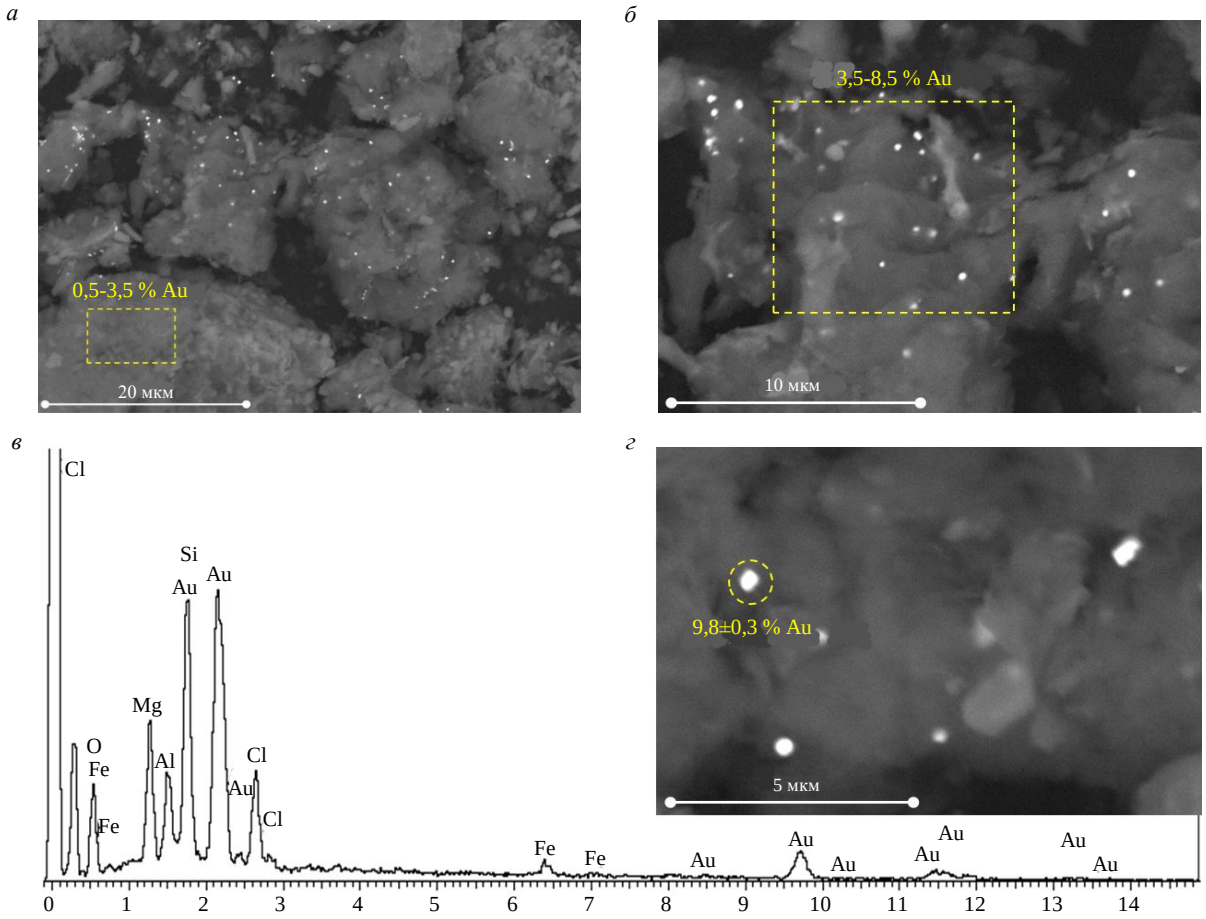


Рис.7. Микрофотографии (*а*, *б*, *г*) поверхности сапонита, модифицированного CTAB, после сорбции и энергодисперсионный спектр (*в*) отдельного новообразования золота (выделен кружком)

Таблица 4

Результаты сорбции золота на модифицированном сапоните (C[Sap_CTAB] = 250 мг/л, C[Au] = 4,5 мг/л, *T* = 25 °C)

Параметр	Объем реального раствора, мл						
	200		+200 (400)	+200 (600)	+200 (800)	+200 (1000)	+200 (1200)
	C_0	C_e	C_e	C_e	C_e	C_e	C_e
C, мг/л	4,5	0,0	0,0	0,1	0,3	3,425	4,5
Σ*E*, %	0,0	100,0	100,0	97,8	93,3	23,9	0,0
q_e, мг/г	0,0	18,0	18,0	17,6	16,8	4,3	0,0
Σq_e, мг/г	0,0	18,0	36,0	53,6	70,4	74,7	74,7

Заключение

Исследованы сорбционные свойства органомодифицированного CTAB сапонита для извлечения золота из продуктивных растворов выщелачивания золотосодержащего концентрата. Установлено, что интеркаляция CTAB до 15 % по массе приводит к расширению межплоскостного пространства сапонита с 14,9 до 21,7 Å, увеличению значения дзета-потенциала в область положительных значений с –41,9 до +32,5 мВ и появлению характерных для метиленовых (CH_2) групп пиков на ИК-спектрах, что обеспечивает более эффективную сорбцию отрицательно заряженных комплексных ионов золота $AuCl_4^-$. Экспериментально установлено, что изотермы сорбции золота на модифицированном сапоните с коэффициентом корреляции 0,9994 соответствуют модели Ленгмюра. При этом кинетические зависимости сорбции наилучшим образом описываются моделью псевдовторого порядка, предполагающей, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции. Рассчитанная равновесная статическая обменная емкость модифицированного сапонита по отношению к золоту ($[AuCl_4]^-$) составила 92-119 мг/г, экспериментальная установленная – 102 мг/г.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Предварительными исследованиями на продуктивном растворе гипохлоритного выщелачивания сульфидного концентрата подтверждена высокая статическая обменная емкость (75 мг/г) модифицированного CTAB сапонита, превышающая заявленную емкость распространенного активированного угля марки GoldSorb – до 20-30 мг/г.

Дальнейшая работа будет направлена на исследование процессов регенерации насыщенных сорбентов, влияния крупности (грануляции) сапонита и ионного состава продуктивных растворов на эффективность извлечения золота.

Авторы выражают благодарность коллегам – старшему научному сотруднику канд. техн. наук М.В.Рязанцевой, главному геологу канд. геол.-минерал. наук Е.В.Копорулиной, младшему научному сотруднику Г.А.Кожевникову (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН) за помощь при выполнении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н.* Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 402-415. DOI: 10.31857/S0016777023050040

2. *Нандиянто А.Б.Д., Нуграха В.К., Юстиа И. и др.* Изотерма и кинетическая адсорбция частиц рисовой шелухи как модельного адсорбента для решения проблем устойчивой добычи золота в результате выщелачивания ртути // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 104-120.

3. *Воропанова Л.А., Кокоева Н.Б.* Способ селективной экстракции ионов золота и серебра из солянокислых растворов трибутилфосфатом // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 823-827. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.823

4. *Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Абурова В.А.* «Невидимые» благородные металлы в углеродистых породах и продуктах обогащения: возможность выявления и укрупнения // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9 (3). С. 231-242. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-229

5. *Heshami M., Taheri B.* An experimental study on the adsorption behavior of gold glycinate complex on graphene oxide // Hydrometallurgy. 2024. Vol. 224. № 106229. DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106229

6. *Romero H., Suarez C., Salazar N. et al.* Evaluation of gold adsorption on activated carbon from real cyanide and thiourea leachate solutions // Heliyon. 2024. Vol. 10. Iss. 11. № e31606. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31606

7. *Епифоров А.В., Козлов А.А., Немчинова Н.В., Селезнев А.Н.* Угольно-сорбционное извлечение золота из сернокислых растворов атмосферного выщелачивания золотомедного флотоконцентрата, содержащих тиоцианат-ион // Цветные металлы. 2020. № 1. С. 38-44. DOI: 10.17580/tsm.2020.01.06

8. *Jinsong Xia, Marthi R., Twinney J., Ghahreman A.* A review on adsorption mechanism of gold cyanide complex onto activation carbon // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2022. Vol. 111. P. 35-42. DOI: 10.1016/j.jiec.2022.04.014

9. *Wypych F., Alves de Freitas R.* Chapter 1 – Clay minerals: Classification, structure, and properties // Developments in Clay Science. 2022. Vol. 10. P. 3-35. DOI: 10.1016/B978-0-323-91858-9.00004-5

10. *Shaojian Xie, Lei Huang, Changqing Su et al.* Application of clay minerals as adsorbents for removing heavy metals from the environment // Green and Smart Mining Engineering. 2024. Vol. 1. Iss. 3. P. 249-261. DOI: 10.1016/j.gsme.2024.07.002

11. *Pengsheng Wang, Xinkai Shen, Shusheng Qiu et al.* Clay-Based Materials for Heavy Metals Adsorption: Mechanisms, Advancements, and Future Prospects in Environmental Remediation // Crystals. 2024. Vol. 14. Iss. 12. № 1046. DOI: 10.3390/cryst14121046

12. *Orucoglu E., Grangeon S., Gloter A. et al.* Competitive Adsorption Processes at Clay Mineral Surfaces: A Coupled Experimental and Modeling Approach // ACS Earth and Space Chemistry. 2022. Vol. 6. Iss. 1. P. 144-159. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.1c00323

13. *Chun Hui Zhou, Qian Zhou, Qi Qi Wu et al.* Modification, hybridization and applications of saponite: An overview // Applied Clay Science. 2019. Vol. 168. P. 136-154. DOI: 10.1016/j.clay.2018.11.002

14. *Krupskaya V.V., Zakusin S.V., Tyupina E.A. et al.* Experimental Study of Montmorillonite Structure and Transformation of Its Properties under Treatment with Inorganic Acid Solutions // Minerals. 2017. Vol. 7. Iss. 4. № 49. DOI: 10.3390/min7040049

15. *Xiaotong Yang, Yi Zhou, Jingjing Hu et al.* Clay minerals and clay-based materials for heavy metals pollution control // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 954. № 176193. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176193

16. *Najafi H., Farajfaed S., Zolgharnian S. et al.* A comprehensive study on modified-pillared clays as an adsorbent in wastewater treatment processes // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 147. P. 8-36. DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.028

17. *Kanglong Cheng, Qin You, Linxi Zou et al.* High-temperature calcination modified red clay as an efficient adsorbent for phosphate removal from water // Environmental Research. 2025. Vol. 268. № 120704. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120704

18. *Kabdrakhmanova S., Aryp K., Shaimardan E. et al.* Acid modification of clays from the Kalzhat, Orta Tentek deposits and study their physical-chemical properties // Materials Today: Proceedings. 2023. 6 p. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.427

19. *Costanza-Robinson M.S., Payne E.M., Dellinger E. et al.* Influence of water saturation on interlayer properties of HDTMA-, HDTMP-, and HDPy-modified montmorillonite organoclays // Applied Clay Science. 2024. Vol. 247. № 107188. DOI: 10.1016/j.clay.2023.107188

20. *Huawen Han, Rafiq M.K., Tuoyu Zhou et al.* A critical review of clay-based composites with enhanced adsorption performance for metal and organic pollutants // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 369. P. 780-796. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.003

21. *Kotal M., Bhowmick A.K.* Polymer nanocomposites from modified clays: Recent advances and challenges // Progress in Polymer Science. 2015. Vol. 51. P. 127-187. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2015.10.001

22. *Shanshan Mao, Manglai Gao.* Functional organoclays for removal of heavy metal ions from water: A review // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 334. № 116143. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116143

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

23. *Perelomov L., Mandzhieva S., Minkina T. et al.* The Synthesis of Organoclays Based on Clay Minerals with Different Structural Expansion Capacities // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 7. № 707. DOI: 10.3390/min11070707

24. *Ханхасаева С.Ц., Бадмаева С.В.* Получение нанопористого сорбента на основе бентонитовой глины и комплексов алюминия для применения в процессах водоочистки // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2024. Т. 60. № 4. С. 413-421. DOI: 10.31857/S0044185624040092

25. *Goronja J.M., Janošević-Ležaić A.M., Dimitrijević B.M. et al.* Determination of critical micelle concentration of cetyltrimethylammonium bromide: Different procedures for analysis of experimental data // Hemijska industrija. 2016. Vol. 70. Iss. 4. P. 485-492. DOI: 10.2298/HEMIND150622055G

26. *Чантурия В.А., Миненко В.Г.* Теоретическое и экспериментальное обоснование методов получения вторичных продуктов из сапонитсодержащих техногенных вод // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 6. С. 91-104. DOI: 10.15372/FTPRPI20230609

27. *Двойченкова Г.П., Миненко В.Г., Масанов А.Ю., Тимофеев А.С.* Обоснование криогенной технологии осветления сапонитсодержащей оборотной воды хвостохранилища обогатительной фабрики № 1 АО «Севералмаз» // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 2 (60). С. 692-709. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-692-709

28. *Wei Hua Yu, Ting Ting Zhu, Dong Shen Tong et al.* Preparation of Organo-Montmorillonites and the Relationship Between Microstructure and Swellability // Clays and Clay Minerals. 2017. Vol. 65. Iss. 6. P. 417-430. DOI: 10.1346/CCMN.2017.064068

29. *Zhiping Shi, Pengxiang Li, Liyan Liu.* Interactions between CTAB and montmorillonite by atomic force microscopy and molecular dynamics simulation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 657. Part B. № 130656. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130656

30. *Чантурия В.А., Самусев А.Л., Миненко В.Г.* Интенсификация химико-электрохимического выщелачивания золота из упорного минерального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 154-164. DOI: 10.15372/FTPRPI20200518

31. *Матвеева Т.Н., Гетман В.В., Каркешкина А.Ю.* Исследование адсорбционных и флотационных характеристик реагента дитиопирилметана для извлечения золота из упорных золотомышьяковых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 4. С. 157-163. DOI: 10.15372/FTPRPI20200415

32. *Wojnicki M., Luty-Błocho M., Socha R.P. et al.* The kinetic studies of gold(III) chloride complex adsorption mechanism from an aqueous and semi-aqueous system // Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 278. P. 43-52. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.01.028

33. *Чантурия В.А., Миненко В.Г., Самусев А.Л. и др.* Сорбция редкоземельных элементов на модифицированном сапоните // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 3. С. 145-154. DOI: 10.15372/FTPRPI20240315

34. *Jorge N.L., Garrafa M.V., Romero J.M. et al.* Adsorption of Ciprofloxacin on Clay Minerals in Argentinian Santa Rosa-Corrientes Soils // Molecules. 2024. Vol. 29. Iss. 8. № 1760. DOI: 10.3390/molecules29081760

35. *Qian Li, Min Yi, Lin Shao et al.* CTAB modified metakaolin-based geopolymer microspheres for the selective adsorption and recovery of TcO_4^-/ReO_4^- // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 350. № 127853. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127853

36. *Oliveira G.A., San Gil R.A.S., Gonzalez W.A. et al.* Synthesis and structural characterization of HPW-doped niobium pillared Brazilian clay // Microporous and Mesoporous Materials. 2024. Vol. 368. № 113030. DOI: 10.1016/j.micromeso.2024.113030

37. *Moslemizadeh A., Aghdam S.K.-Y., Shahbazi Kh. et al.* Assessment of swelling inhibitive effect of CTAB adsorption on montmorillonite in aqueous phase // Applied Clay Science. 2016. Vol. 127-128. P. 111-122. DOI: 10.1016/j.clay.2016.04.014

38. *Yunyan Zhu, Yuming Cui, Yiming Peng et al.* Preparation of CTAB intercalated bentonite for ultrafast adsorption of anionic dyes and mechanism study // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 658. № 130705. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130705

39. *Jianlong Wang, Xuan Guo.* Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 390. № 122156. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122156

40. *El Abbadi S., El Moustansiri H., Douma M. et al.* Enhancing the performance of alumina-pillared clay for phenol removal from water solutions and polyphenol removal from olive mill wastewater: Characterization, kinetics, adsorption performance, and mechanism // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 63. № 105432. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105432

41. *Jianlong Wang, Xuan Guo.* Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method // Chemosphere. 2020. Vol. 258. № 127279. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127279

42. *Maleki S., Abedi E., Hashemi S.M.B.* Insights into kinetic, isotherm, and thermodynamic of ultrasound mode- and amplitude-dependent carotenoid and chlorophyll degradation or/and adsorption // Ultrasonics Sonochemistry. 2024. Vol. 111. № 107130. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.107130

43. *Allaoui I., El Mourabit M., Arfoy B. et al.* Adsorption equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies on the removal of paracetamol from wastewater using natural and HDTMA-modified clay // Desalination and Water Treatment. 2024. Vol. 318. № 100345. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100345

***Авторы*: Валентин Алексеевич Чантурия,** *д-р техн. наук, академик РАН, главный научный сотрудник* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-4410-8182, **Владимир Геннадиевич Миненко,** *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0001-9117-4310, **Андрей Леонидович Самусев,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник* (*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*), Andrey63vzm@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7324-0353.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0