

---

---

**НАНОРАЗМЕРНЫЕ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ**

---

---

УДК 544.723.5+ 541.183/183.7+628.316

**ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПОРИСТОГО СОРБЕНТА  
НА ОСНОВЕ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ  
И КОМПЛЕКСОВ АЛЮМИНИЯ  
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ВОДООЧИСТКИ**

© 2024 г. С. Ц. Ханхасаева<sup>а,\*</sup>, С. В. Бадмаева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия,  
\*e-mail: shan@binm.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 20.02.2024 г.

Принята к публикации 27.08.2024 г.

Получены Al-интеркалированные материалы на основе природной и натриевой формы бентонитовой глины и полиоксокомплексов алюминия методом интеркаляции и последующей термообработки при 500°C. Изучены структура и физико-химические свойства полученных материалов. Установлено, что интеркалированные материалы имеют микропористую структуру и удельную поверхность, превышающую в 2 раза поверхность бентонитовой глины. Изучены адсорбционные свойства материалов по отношению к анионному красителю “Кислотный желтый 36”. Сорбционная емкость интеркалированных материалов увеличилась до 7 раз по сравнению с исходной глиной. Определены физико-химические параметры, влияющие на адсорбцию. Изотерма адсорбции красителя относится к изотерме II типа по классификации ИЮПАК. Кинетические закономерности адсорбции красителя согласуются с моделью кинетики псевдвторого порядка с коэффициентом корреляции 0.9996. Адсорбция красителя на Al-интеркалированных материалах является самопроизвольным эндотермическим процессом. Полученные сорбенты могут найти применение в очистке воды от анионных загрязнителей.

*Ключевые слова:* бентонитовая глина, Al-интеркалированные материалы, адсорбция, анионный краситель, кинетика адсорбции, равновесие, термодинамика

**DOI:** 10.31857/S0044185624040092, **EDN:** LYRTDV

## ВВЕДЕНИЕ

Глинистые минералы относятся к дешевым и широко доступным природным материалам и характеризуются высокой удельной поверхностью и наличием различных функциональных групп, способных сорбировать широкий ряд загрязняющих воду веществ. Бентонитовые глины являются хорошими катионообменниками, что позволяет эффективно использовать их в сорбционной очистке воды от катионных загрязнителей [1]. В настоящее время актуальной задачей является разработка на основе природных

глинистых минералов эффективных сорбентов, способных удалять из воды загрязняющие вещества анионного типа. В качестве таких сорбентов большой интерес представляют материалы со слоисто-столбчатой структурой, получаемые путем интеркаляции полиоксокомплексов металлов в структуру набухающих глин, к которым относится монтмориллонит, преобладающий минерал в составе бентонитовых глин [2]. Материалы данного типа характеризуются стабильной нанопористой структурой, большей удельной поверхностью и большим количеством сорбционных центров по сравнению с природ-

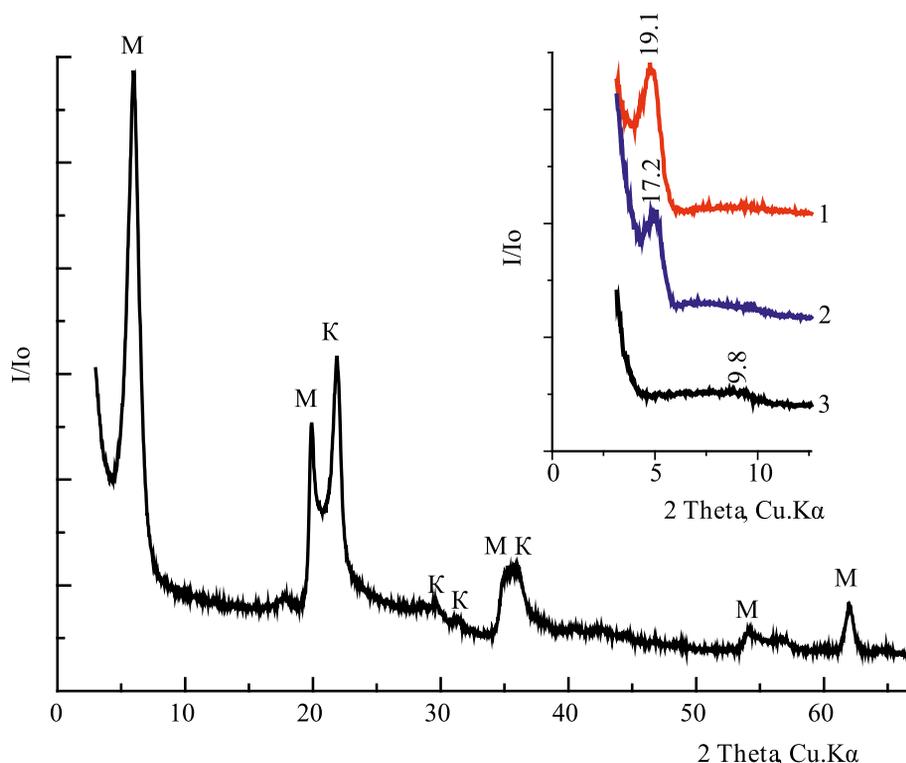
ной глиной. Целью данной работы являлось получение Al-интеркалированных материалов (Al-ИМ) из бентонитовой глины и исследование их адсорбционных свойств в отношении анионных загрязнителей воды (на примере азокрасителя “Кислотный желтый 36”).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходного материала использовалась мелкодисперсная фракция (размер частиц 0.002 мм) глины Мухорталинского месторождения (Восточная Сибирь). Минералогический состав данной фракции состоял в основном из монтмориллонита (Мт) (90%) и примеси кристобалита [3], как показали результаты рентгенофазового анализа (рис. 1), который был проведен на автодифрактометре STADI P фирмы STOE (CuK $\alpha$ 1-излучение,  $2\theta = 3^\circ-77^\circ$ ). Химический состав был представлен оксидами (масс. %): SiO $_2$ –65.50; Al $_2$ O $_3$ –14.30; Fe $_2$ O $_3$ –1.78; MgO–1.42; CaO–1.08; K $_2$ O–0.20; Na $_2$ O–0.10; FeO–0.22; MnO–0.02; TiO $_2$ –0.19; P $_2$ O $_5$ –0.03; потери после прокаливания (п.п.п.) – 15.16.

Для синтеза Al-ИМ1 использовалась натриевая форма Мт, которая была получена путем

обработки природной Са-формы Мт 1М раствором NaCl при 80 °С в течение 2ч и промывания дистиллированной водой для удаления избытка хлорида натрия. Выбор Na-формы Мт в качестве исходного материала обусловлен большей способностью Na-формы к диспергированию вследствие слабого связывания одновалентного катиона Na $^+$  с силикатными слоями глины. Для получения Al-ИМ2 использовалась природная (кальциевая) форма Мт, водная суспензия которой с соотношением твердой и жидкой фаз (Т/Ж) 1/100 была предварительно обработана ультразвуком (мощность 22 кГц) в течение 3 мин, поскольку для двухвалентного катиона Ca $^{2+}$  характерно сильное связывание с противоположными силикатными слоями глины, что затрудняет диффузию комплексов в межслоевое пространство. Получение интеркалирующих растворов (ИР) полиоксокомплексов алюминия осуществлялось щелочным гидролизом 0.2 М раствора соли AlCl $_3$  путем прибавления 0.2 М раствора NaOH (мольное соотношение OH/Al 2.0, pH 4.2). Полученный ИР подвергали нагреванию при 50°С в течение 24 ч. При данных условиях синтеза преобладающими катионами (около 87%) являются



**Рис. 1.** Дифрактограмма тонкодисперсной фракции глины, использованной для синтеза материалов (М – монтмориллонит, К – кристобалит) [3]. Вставка – дифрактограммы Al-ИМ: 1 – 120°С, 2 – 500°С, 3 – глина (500°С).

тридекамеры алюминия со структурой Кеггина  $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$  [4]. Затем ИР добавляли в суспензию глины, нагретой до  $80^\circ C$ , до достижения конечного соотношения  $Al/глина = 3$  ммоль/г. Смесь выдерживали при  $80^\circ C$  в течение 3 часов и оставляли стоять при комнатной температуре в течение 24 ч. После этого твердую фазу, отделенную от жидкости, промывали дистиллированной водой, высушивали при комнатной температуре и прокаливали при  $500^\circ C$  в течение 2 ч.

Текстурные характеристики материалов рассчитывали по стандартным методикам [5] из данных низкотемпературной адсорбции азота, снятых на приборе “Micromeritics”. Химический состав материалов определяли спектрофотометрическим методом (Si, Al) и атомно-абсорбционным методом после спекания образцов с бурой и содой и последующего растворения в кислоте [6]. Точку нулевого заряда определяли методом “дрифта” [7].

В качестве модели анионных загрязнителей воды был использован азокраситель “Кислотный желтый 36” (КЖ), широко используемый для окрашивания изделий из кожи, шерсти, бумаги, древесины, а также фармацевтической и косметической продукции. Его структурная формула изображена на рис. 2.

Адсорбционные эксперименты проводили следующим образом: в колбу с водным раствором красителя с известной начальной концентрацией насыпали рассчитанную массу сорбента, суспензию перемешивали на устройстве ЛАБ-ПУ-01 со скоростью 180 об./мин. При исследовании кинетики адсорбции пробы отбирали через 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240 мин, отделяли раствор от сорбента и определяли в нем остаточную концентрацию красителя по величине оптической плотности, которую измеряли на спектрофотометре UV-Vis Agilent 8453 (Agilent Technologies, США) при 442 нм. Текущую удельную адсорбцию ( $q_t$ ) рассчитывали по формуле (1):

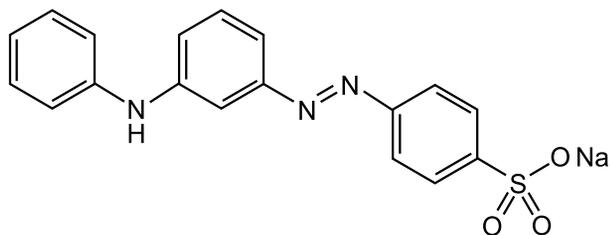


Рис. 2. Структура красителя “Кислотный желтый 36”

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{m} V, \quad (1)$$

где,  $q_t$  – количество красителя, адсорбированного на 1 г сорбента в момент времени  $t$ , мг/г;  $C_0$  – начальная концентрация раствора красителя, мг/л;  $C_t$  – концентрация раствора красителя при данном времени  $t$ , мг/л;  $m$  – масса сорбента, г;  $V$  – объем раствора красителя, л.

При определении равновесной адсорбции пробу отбирали через 4 ч (время достижения адсорбционного равновесия). Равновесную удельную адсорбцию ( $q_e$ ) рассчитывали по формуле (1) при времени 4 ч. В опытах по изучению влияния физико-химических параметров на адсорбцию содержание сорбента изменялась в интервале 1.0–25.0 г/л, pH 3.9–7.1, начальная концентрация красителя 25.0–405.0 мг/л, температура 298–323 К.

Эффективность удаления красителя ( $\mathcal{E}$ ) из водного раствора рассчитывали по формуле (2):

$$\mathcal{E} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \cdot 100\%. \quad (2)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация красителя,  $C_t$  – концентрация красителя в момент времени  $t$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ дифрактограмм образцов глины и интеркалированных материалов, высушенных при  $120^\circ C$ , показывает, что рефлекс [001], соответствующий первому базальному отражению, смещается в малоугловую область для Al-ИМ-1, 2. Это указывает на увеличение межплоскостного расстояния  $d_{001}$  от 14.7 (исходная глина) до 19.1 Å (Al-ИМ2) вследствие успешной интеркаляции комплексов алюминия в межслоевое пространство глины (рис. 1, вставка). При нагреве происходит дегидратация и дегидроксилирование комплексов алюминия, что приводит к уменьшению межплоскостного расстояния до 17.2 Å, в то время как для природной глины наблюдается значительное снижение интенсивности рефлекса [001] и уменьшение  $d_{001}$  до 9.8 Å.

Сохранение высоких значений  $d_{001}$  для Al-ИМ-500°C указывает на формирование слоисто-столбчатой структуры, что обусловлено образованием частиц оксида алюминия в межслоевых промежутках [8]. Это подтверждается образованием микропор и увеличением удельной поверхности полученных материалов по сравнению с исходной глиной (табл. 1), а так-

Таблица 1. Текстурные свойства материалов

Образец		$S_{уд}$ (БЭТ) м <sup>2</sup> /г	$\Sigma V_{пор}$ см <sup>3</sup> /г	$D_{пор}$ , Å	$\Sigma V_{\mu}$ см <sup>3</sup> /г	$d_{001}$ , Å	$I/I_0$
Глина	120°C	109	0.270	99	0.004	14.7	100
	500°C	90	0.253	110	<0.001	9.8	6
Al-ИМ1	120°C	211	0.360	68	0.024	18.3	52
	500°C	179	0.302	67	0.017	17.5	27
Al-ИМ2	120°C	274	0.249	36	0.076	19.1	100
	500°C	192	0.221	46	0.045	17.2	100

$S_{уд}$  – площадь удельной поверхности;  $V_{пор}$  – общий объем пор;  $D_{пор}$  – средний диаметр пор;  $V_{\mu}$  – объем микропор;  $d_{001}$  – межплоскостное расстояние;  $I/I_0$  – относительная интенсивность рефлекса [001].

же увеличением содержания оксида алюминия. Согласно данным химического анализа состав интеркалированных материалов был представлен оксидами элементов (масс. %) **Al-ИМ-1**:  $Al_2O_3$  – 17.8;  $SiO_2$  – 65.5;  $Na_2O$  – 0.26;  $K_2O$  – 0.20;  $MgO$  – 0.87;  $CaO$  – 0.03;  $Fe_2O_3$  – 1.17; п.п.п. – 14.17; **Al-ИМ-2**:  $Al_2O_3$  – 19.8;  $SiO_2$  – 65.0;  $Na_2O$  – 0.10;  $K_2O$  – 0.10;  $MgO$  – 0.60;  $CaO$  – 0.02;  $Fe_2O_3$  – 0.70; п.п.п – 13.68.

Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что при синтезе Al-ИМ2 обработка суспензии природной глины ультразвуком приводит к ослаблению связывания алюмосиликатных слоев и большему диспергированию частиц глины, что позволило получить интеркалированные материалы с большей удельной поверхностью по сравнению с Al-ИМ1, полученным из Na-формы без воздействия УЗ, при этом сокращается время синтеза, уменьшается расход реагентов и воды. Для Al-ИМ2 наблюдалось уменьшение среднего диаметра пор вследствие увеличения количества микропор, объем которых возрастает почти в 3 раза по сравнению с Al-ИМ1. Значения  $d_{001}$  практически не меняются, но увеличивается интенсивность данного рефлекса в 3.7 раза, что свидетельствует об образовании большого количества алюмооксидных частиц в межслоевом пространстве Мт.

Развитая удельная поверхность и увеличение количества адсорбционных центров Al-OH открывают возможности применения интеркалированных материалов в качестве сорбентов. На примере азокрасителя “Кислотный желтый 36” была изучена возможность использования Al-ИМ2 в очистке воды от анионных загрязнителей.

Анионообменные свойства глин обусловлены наличием на боковых сколах алюмоси-

ликатных слоев небольшого числа гидроксильных групп Al-OH, Mg-OH, Fe-OH, которые при значениях pH меньше ТНЗ (значение pH, при котором суммарный заряд поверхности сорбента равен нулю) диссоциируют по основному типу, а при pH больше ТНЗ диссоциируют по кислотному типу [9]. Поскольку количество таких центров в природной глине очень ограничено, то для глин характерна малая анионообменная способность. Результаты опытов по сравнительному тестированию адсорбции красителя на глине и Al-ИМ2 показали, что адсорбция красителя при pH 6.5 равнялась 1.7 (глина) и 18.3 (Al-ИМ2) мг/г, а при pH 4.5 адсорбция составляла 4.5 (глина) и 21.9 (Al-ИМ2) мг/г. Увеличение адсорбционной способности глины после интеркаляции комплексами алюминия вызвано увеличением удельной поверхности и количества анионообменных центров Al-OH в Al-ИМ. Нами было изучено влияние физико-химических параметров (загрузка сорбента, величина pH, начальная концентрация красителя и температура) на адсорбцию красителя в водных растворах.

Зависимость адсорбции красителя от времени при разном содержании сорбента представлена на рис. 3 (а). Видно, что краситель быстро сорбируется в первые 25 мин контакта, затем скорость адсорбции постепенно снижается. При времени, большем 180 мин, адсорбция практически не изменяется, что свидетельствует о достижении адсорбционного равновесия вследствие полного насыщения поверхности сорбента красителем. Графические зависимости равновесной адсорбции и эффективности удаления красителя от содержания сорбента приведены на рис. 3 (б).

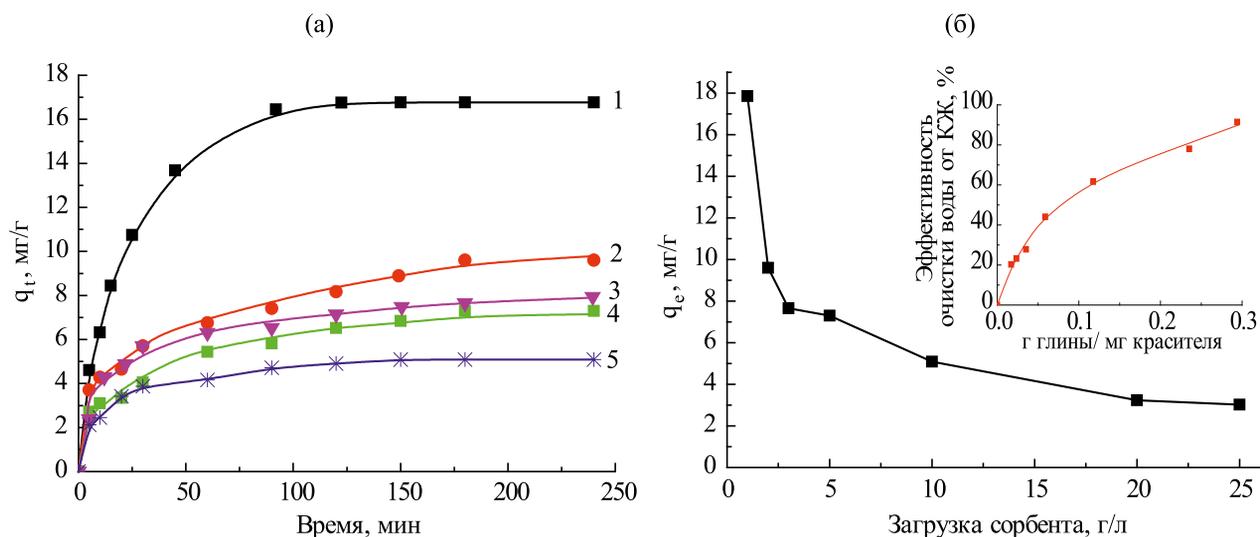


Рис. 3. Кинетические кривые адсорбции красителя при разном содержании сорбента: 1 – 1 г/л; 2 – 2 г/л; 3 – 3 г/л; 4 – 5 г/л; 5 – 10 г/л (а), зависимости  $q_e$  (б) и эффективности удаления красителя (внутри б) от содержания Al-ИМ. ( $C_0$  (КЖ) = 85 мг/л, pH 6.3).

Увеличение содержания сорбента от 1 г/л до 25 г/л приводит к увеличению эффективности удаления красителя от 21.6% до 91.5%, что обусловлено увеличением количества адсорбционных центров, взаимодействующих с растворенным красителем. Равновесная адсорбция уменьшается от 17.9 до 3.0 мг/г (рис. 3 (б)) вследствие того, что с увеличением отношения массы сорбента к массе красителя уменьшается эффективность использования его поверхности, и увеличивается доля свободных адсорбционных центров, не участвующих в адсорбции красителя [10].

Величина pH является одним из ключевых параметров, влияющих на адсорбцию в водных растворах, поскольку она влияет как на состояние растворенных частиц адсорбата, так и на поляризацию поверхности адсорбента. Краситель КЖ относится к кислотным красителям и в изучаемом диапазоне значений pH раствора (4.0–7.1) находится в виде окрашенного органического аниона и катиона натрия. На рис. 4 приведена зависимость равновесной адсорбции красителя ( $q_e$ ) от pH раствора (загрузка сорбента 1 г/л,  $C_{\text{крас}} = 85$  мг/л).

Наблюдаемое влияние pH на адсорбцию красителя согласуется с известными закономерностями адсорбции анионов на оксидных сорбентах, поверхность которых способна к поляризации в водной среде и в зависимости от pH среды имеет положительный или отрицательный заряд. Сродство поверхности сорбентов

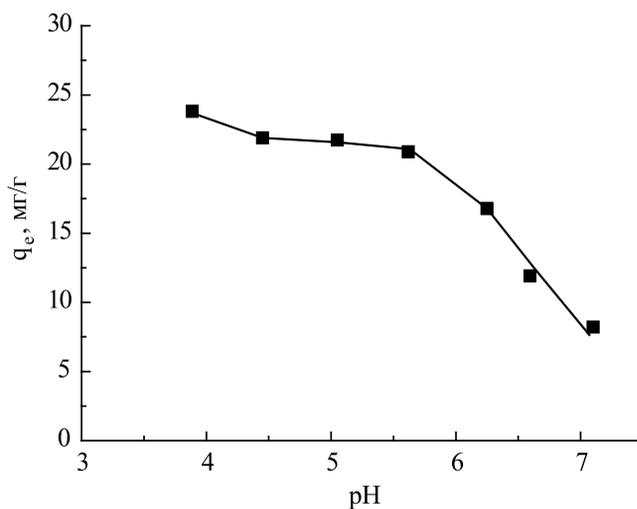


Рис. 4. Зависимость равновесной адсорбции красителя от pH раствора.

к ионным сорбатам определяется точкой нулевого заряда ( $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$ ). При pH ниже  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$  поверхность заряжена положительно, что способствует увеличению адсорбции анионов, при pH выше  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$  поверхность сорбента заряжается отрицательно и наблюдается уменьшение адсорбции анионов [11]. Для Al-ИМ2 величина ТНЗ равнялась 5.1, как было определено нами методом “дрифта”. Адсорбция красителя уменьшается при изменении pH от 4.0 до 4.7. В интервале значений pH, близких к ТНЗ (от 4.7 до 5.6), наблюдается слабое уменьшение адсорбции. После

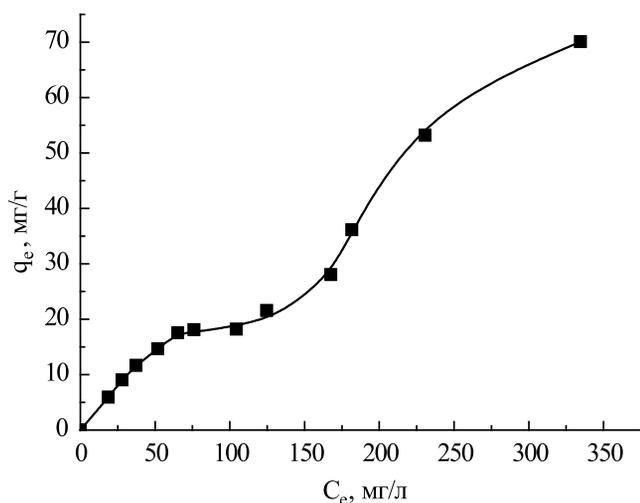
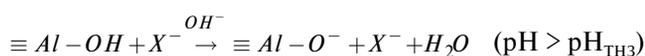
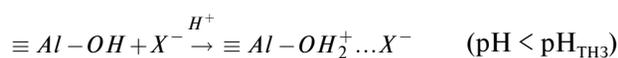


Рис. 5. Зависимость равновесной адсорбции от равновесной концентрации красителя.

перехода рН через ТНЗ наблюдается значительное уменьшение адсорбции красителя, что обусловлено тем, что поверхность АІ-ИМ2 заряжается отрицательно и способствует отталкиванию анионов красителя.



Для изучения зависимости адсорбции от концентрации красителя проводились опыты при его разных начальных концентрациях 25.0–405.0 мг/л и фиксированных значениях других параметров. Результаты проведенных опытов приведены в виде зависимости равновесной адсорбции от равновесной концентрации красителя в растворе (рис. 5).

Изотерма адсорбции красителя имеет S-образную форму и относится к изотерме II типа по классификации ИЮПАК, которая характерна для полислоистой адсорбции [12]. Изотермы подобного вида наблюдались для адсорбции красителей на ряде сорбентов [13–15]. Адсорбция красителя КЖ на изучаемом сорбенте постепенно увеличивалась по мере роста равновесной концентрации до 78 мг/л, затем перестала изменяться в интервале концентраций красителя 78–125 мг/л, что указывает на формирование монослоя молекул красителя на поверхности АІ-ИМ. Дальнейшее увеличение концентрации приводило к резкому увеличению

Таблица 2. Термодинамические параметры адсорбции красителя КЖ на АІ-ИМ

T, K	K <sub>d</sub> , L·г <sup>-1</sup>	K	ΔG <sup>o</sup> , кДж/моль	ΔH <sup>o</sup> , кДж/моль	ΔS <sup>o</sup> , Дж/(моль·K)
298	0.269	100.98	-11.43		
303	0.303	113.75	-11.92		
308	0.328	123.13	-12.32	14.34	86.63
313	0.386	144.90	-12.95		
323	0.422	158.42	-13.60		

адсорбции, что обусловлено полислоистой адсорбцией частиц красителя.

Для изучения влияния температуры на адсорбцию красителя были проведены опыты при температурах 298, 303, 308, 313 и 323 К и начальной концентрации красителя КЖ 85 мг/л, рН 6.1. На основе полученных значений равновесной адсорбции были рассчитаны величины коэффициентов распределения (K<sub>d</sub> = q<sub>e</sub>/C<sub>e</sub>). Константы равновесия адсорбции K определялись по формуле K = K<sub>d</sub> · M, где M – молекулярная масса красителя [16]. Для расчета ΔG<sup>o</sup> (изменение свободной энергии Гиббса) применялось уравнение 3 [17]:

$$\Delta G^o = -RT \ln K \quad (3)$$

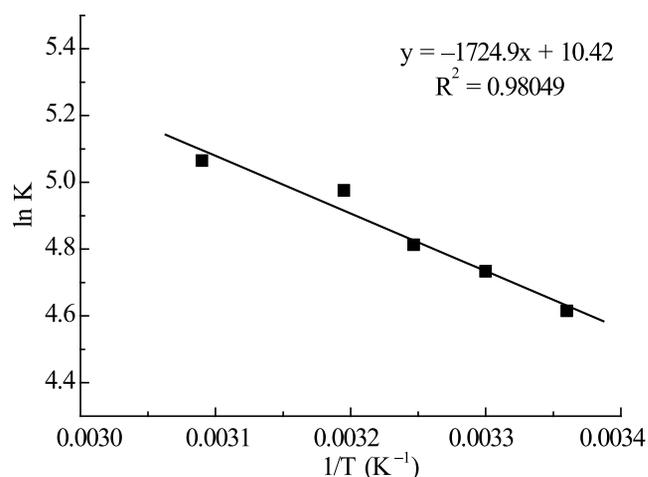


Рис. 6. Зависимость ln K от обратной температуры.

**Таблица 3.** Кинетические уравнения и линейные формы уравнений моделей псевдопервого, псевдovторого порядков

Модель	Кинетическое уравнение	Линейная форма
Псевдопервого порядка	$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$
Псевдovторого порядка	$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$

Где  $q_t$  и  $q_e$  – количество вещества, адсорбированного на 1г сорбента за время  $t$  и за время достижения равновесия, соответственно (мг/г);  $k_1$  – константа скорости псевдопервого порядка, (1/мин),  $k_2$  – константа скорости псевдovторого порядка, (г/(мг мин)).

Величины  $\Delta S^\circ$  (энтропия адсорбции) и  $\Delta H^\circ$  (энтальпия адсорбции) определялись графически по уравнению Вант-Гоффа (4) (рис. 6):

$$\ln K = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT}, \quad (4)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура.

Полученные значения термодинамических параметров адсорбции красителя приведены в табл. 2.

Увеличение температуры приводило к увеличению адсорбции красителя, как показывают величины коэффициента распределения (табл. 2). Значения изменений энергии Гиббса  $\Delta G^\circ$  являются отрицательными и незначительно уменьшаются с ростом температуры в пределах от  $-11.43$  кДж/моль до  $-13.60$  кДж/моль. Отрицательные значения энергии Гиббса указывают на то, что адсорбция красителя на изучаемом сорбенте является самопроизвольным процессом. Положительное значение энтальпии свидетельствует об эндотермическом характере адсорбции, что наблюдается для химической адсорбции [18].

Для выяснения механизма адсорбции кинетические кривые адсорбции красителя были проанализированы с применением моделей адсорбции псевдопервого и псевдovторого порядков (табл. 3) [19].

Экспериментальные данные по адсорбции красителя представлены в координатах линейных форм данных моделей (рис. 7), рассчитанные кинетические параметры приведены в табл. 4.

Коэффициенты корреляции  $R^2$  для моделей псевдопервого порядка составляли 0.9134–0.9985. Величины равновесной адсорбции, рассчитанные по данной модели, значительно отличались от их экспериментальных значений  $q_e$ . Для модели псевдovторого порядка коэффициенты корреляции были ближе к 1 (0.9992–0.9999), а экспериментальные величины  $q_e$  были близки к теоретическим значениям. Кинетика адсорбции красителя удовлетворительно согласуется с моделью кинетики псевдovторого порядка, что обычно наблюдается для хемосорбции [19].

Было проведено сравнение сорбционной емкости А1-ИМ2 с сорбционной емкостью некоторых угольных сорбентов в отношении

**Таблица 4.** Кинетические параметры адсорбции КЖ

$C_0$ , мг/л	$(q_e)_{\text{exp}}$ , мг/г	псевдо-первый порядок			псевдо-второй порядок		
		$q_1$ , мг/г	$k_1 \cdot 10^2$ , мин <sup>-1</sup>	$R^2$	$q_2$ , мг/г	$k_2$ , г/(мг·мин)	$R^2$
25	5.9	4.2	0.060	0.9134	6.0	0.1272	0.9999
50	11.6	13.3	0.026	0.9613	12.1	0.0098	0.9968
85	16.8	14.4	0.015	0.9985	17.9	0.0050	0.9972
120	18.2	8.4	0.019	0.9753	18.4	0.0191	0.9997
200	24.6	19.3	0.030	0.9849	25.1	0.0112	0.9992

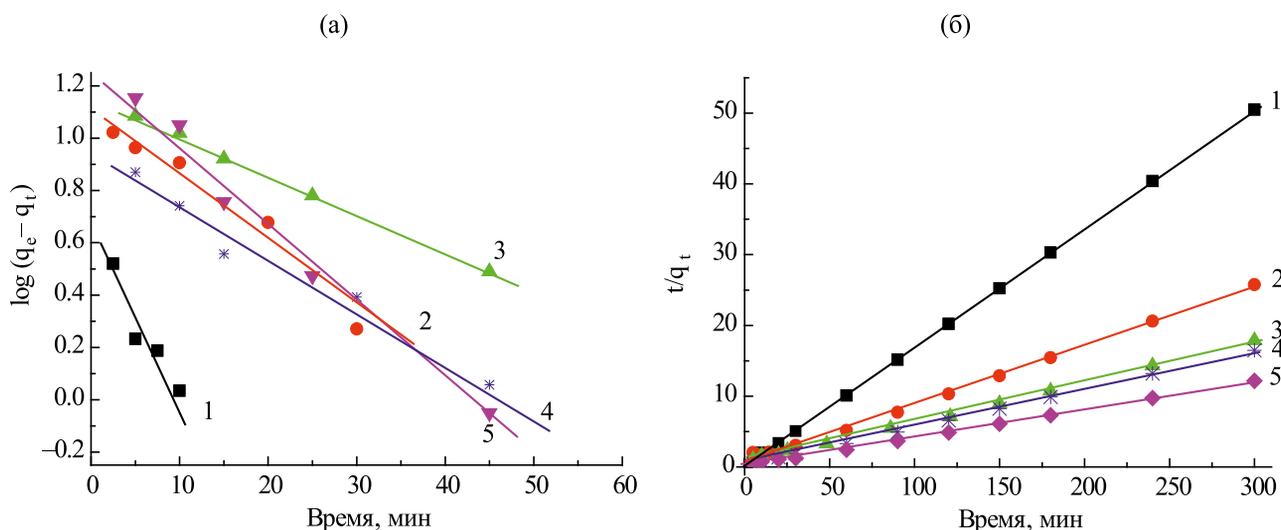


Рис. 7. Линейные графики моделей псевдопервого (а), псевдовторого порядка (б) при концентрациях красителя: 1 – 25 мг/л, 2 – 50 мг/л, 3 – 85 мг/л, 4 – 120 мг/л, 5 – 200 мг/л.

красителя КЖ. Максимальная сорбционная емкость АІ-ИМ2 равнялась 73.6 мг/г (в изученном нами диапазоне начальных концентраций красителя), а для угольных сорбентов составляла 66.2 мг/г (активный уголь из рисовой шелухи [20]), 99.2 мг/г (активный уголь из скорлупы кокосового ореха [20]) и 76.3 мг/г (аминофункционализированный графен [21]), что указывает на то, что сорбционная способность АІ-ИМ2 является сопоставимой с данными сорбентами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы сорбционные материалы на основе бентонитовой глины и полиоксокомплексов алюминия методом интеркаляции и последующей термообработки. Изучены структура и физико-химические свойства полученных АІ-интеркалированных материалов (АІ-ИМ). Исследованы их адсорбционные свойства в отношении анионных загрязнителей воды (на примере азокрасителя “Кислотный желтый 36”). Показано, что интеркаляция полиоксокомплексов алюминия и термообработка при 500°C приводят к увеличению удельной поверхности глины в 2 раза и увеличению сорбционной емкости в отношении красителя до 7 раз. Основными физико-химическими параметрами, влияющими на адсорбцию красителя на АІ-ИМ, являются рН раствора, содержание сорбента, концентрация красителя и температура. Адсорбция красителя возрастает при

уменьшении рН, содержания сорбента, увеличении начальной концентрации красителя и температуры. Установлено, что кинетические закономерности адсорбции красителя удовлетворительно согласуются с моделью кинетики псевдовторого порядка. Адсорбция красителя на АІ-ИМ является самопроизвольным эндотермическим процессом. Результаты исследования показали перспективность применения полученных материалов в очистке воды от анионных загрязнителей.

## ФИНАНСИОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН (проект № 0273–2021–006).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pourhakkak P., Taghizadeh M., Taghizadeh A., Ghaedi M. // *Interface Sci. Technol.* 2021. V. 33. P. 71–210.
2. Eisenhour D.D., Brown R.K. // *Elements.* 2009. V. 5. P. 83–88.
3. Khankhasaeva S.Ts., Dashinamzhilova E.Ts., Dambueva D.V. // *Appl. Clay Sci.* 2017. V. 146. P. 92–99.
4. Gardona Y., Korili S.A., Gil A. // *Appl. Clay Sci.* 2021. V. 203. P. 105996.
5. Абызов А.М. Измерение удельной поверхности дисперсных материалов методом низкотемпературной адсорбции газа: Практикум. СПб: СПбГИ(ТУ), 2016. С. 37.

6. Методика количественного химического анализа. Ускоренные химические методы определения породообразующих элементов в горных породах и рудах. Отраслевая методика III категории точности: Методика № 138 – X. М.: ВИМС, 2005. С. 57.
7. Liu Q., Zhong L.B., Zhao Q.B. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. V. 7. P. 14573–14583.
8. Leonova Yu.O., Sevostyanov M.A., Mezentssev D.O. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 1942. P. 012052.
9. Осипов В.И. Глины и их свойства: состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. С. 576.
10. Vimonses V., Lei S., Jin B. et al. // J. Chem. Eng. 2009. V. 148. P. 354–364.
11. Печенюк С.И. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. Т. 8. № 3. С. 380–429.
12. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. С. 306.
13. Liu N., Zhu M., Wang H., Ma H. Adsorption characteristics of direct red 23 from aqueous solution by biochar // J. Mol. Liq. 2016. V. 223. P. 335–342.
14. Mirzaei A., Chen Z., Haghghat F., Yerushalmi L. // Chem. Eng. J. 2017. V. 330. P. 407–418.
15. Scheufele F.B., M'odenes A.N., Borba C.E. et al. // Chem. Eng. J. 2016. V. 284. P. 1328–1341.
16. Lima E.C., Hosseini-Bandegharaei A., Moreno-Piraján J.C., Anastopoulos I. // J. Mol. Liq. 2019. V. 273. P. 425–434.
17. Salvestrini S., Leone V., Iovino P. et al. // J. Chem. Thermodynam. 2014. V. 68. P. 310–316.
18. Basu S., Ghosh G., Saha S. // Process Saf. Environ. Prot. 2018. V. 117. P. 125–142.
19. Gupta S.S., Bhattacharyya K.G. // Adv. Colloid Interface. 2011. V. 162. № 1–2. P. 39–58.
20. Santra A.K., Pal T.K., Datta S. // Sep. Sci. Technol. 2008. V. 43. P. 1434–1458.
21. Guo X., Wei Q., Du B. et al. // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 284. P. 862–869.