

Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 2 / 2025, Vol. 8, Iss. 2 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 544.723.21

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-2

Бентонит Нальчикского месторождения и возможности его использования как катионного адсорбента

¹ Везенцев А.И. *,

² Эфендиев Б.Ш.,

³ Нестерова Л.Л.,

¹ Шайдорова Г.М.,

¹ Вьялкин А.А.,

¹ Белгородский государственный научный исследовательский университет,

² Федеральный научный центр Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук,

³ Югорский государственный университет,

* Ответственный автор E-mail: vesentsev@bsu.edu.ru

Аннотация: установлены химические, минералогические, гранулометрические и структурно-морфологические характеристики бентонитовых глин Нальчикского месторождения. Элементный состав содержит В (следовые количества), Al, Si, K, Ca, Ti, Fe. Выявлено, что минералогический состав исследуемой глины сложен монтмориллонитом, клиноптилолитом и низкотемпературным тригональным кварцем. Содержание монтмориллонита 53.0 ± 1.1 масс.%. Максимальный размер частиц составляет 198.7-210.1 мкм, доля таких частиц – 0.69 масс.%. Минимальный размер частиц 0.6-0.9 мкм, доля таких частиц – 1.22 масс.%. По результатам дифференциально-термического анализа зафиксированы 4 эндоэффекта, суммарная потеря массы при прокаливании образца – 16.5 %, с учётом потери свободной воды – 9.5 масс.%. Исследованы адсорбционные характеристики анализируемого бентонита с помощью «модельных» загрязнителей – катионов никеля (II) и красителя метиленового голубого. Установлено, что изотерма адсорбции ионов никеля (II) относится к классу L типа 3, а изотерма адсорбции метиленового голубого относится к классу L типа 2 по классификации Гильса. По результатам исследования показано, что бентонитовая глина Нальчикского месторождения способна отчистить сточные воды до предельно допустимой концентрации катионных загрязнителей.

Цели: исследовать вещественный состав и адсорбционные свойства бентонитовой глины Нальчикского месторождения.

Методы. Для определения элементного, фазового и гранулометрического состава, применялось следующее оборудование: просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100 (Jeol, Япония), дифрактометр Ultima IV (Rigaku, Япония), совмещенный анализатор ТГ/ДТГ/ДТА SDT Q600 (TA Instruments, Inc., США), анализатор размера частиц Microtrac S3500 (США), а также приборы и реактивы лабораторного назначения.

Результаты. Установлен минералогический состав образца глины Нальчикского месторождения; определено массовое содержание монтмориллонита. Изучен гранулометрический состав. Исследованы адсорбционные процессы образца глины по отношению к органическому красителю метиленовому голубому и ионам никеля (II).

Выводы. Установлен минералогический состав образца глины Нальчикского месторождения: монтмориллонит, клиноптилолит и низкотемпературный тригональный кварц. Содержание монтмориллонита составляет 53.0 ± 1.1 масс.%. Максимальный размер частиц фракции в исследуемом образце глины – 198.7-210.1 мкм, доля таких частиц – 0,69 масс.%. Минимальный размер частиц фракции 0.6-0.9 мкм, доля частиц – 1.22 масс.%. Исследованы адсорбционные процессы образца глины по отношению к органическому красителю метиленовому голубому и ионам никеля (II). Показано, что глина Нальчикского месторож-

дения способна отчистить сточные воды от указанных катионных загрязнителей до нормативных требований.

Ключевые слова: бентонитовые глины, адсорбция, адсорбенты, тяжёлые металлы, сточные воды

Для цитирования: Везенцев А.И., Эфендиев Б.Ш., Нестерова Л.Л., Шайдорова Г.М., Вьялкин А.А. Бентонит Нальчикского месторождения и возможности его использования как катионного адсорбента // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-2

Поступила в редакцию: 12 января 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 16 марта 2025 г.; Принята к публикации: 19 мая 2025 г.

Bentonite from the Nalchik deposit and the possibilities of its use as a cationic adsorbent

¹ Vezentsev A.I. *,

² Efendiev B.Sh.,

³ Nesterova L.L.,

¹ Shandorova G.M.,

¹ Vyalkin A.A.,

¹ Belgorod State National Research University,

² Federal Scientific Center Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,

³ Yugra State University,

* Corresponding author E-mail: vesentsev@bsu.edu.ru

Abstract: chemical, mineralogical, granulometric and structural-morphological characteristics of bentonite clays of the Nalchik deposit have been established. The elemental composition contains B (trace amounts), Al, Si, K, Ca, Ti, Fe. It has been revealed that the mineralogical composition of the studied clay is complex of montmorillonite, clinoptilolite and low-temperature trigonal quartz. The montmorillonite content is 53.0 ± 1.1 wt.%. The maximum particle size is 198.7-210.1 μm , the proportion of such particles is 0.69 wt.%. The minimum particle size is 0.6-0.9 μm , the proportion of such particles is 1.22 wt.%. According to the results of differential thermal analysis, 4 endoeffects were recorded, the total mass loss on sample calcination was 16.5%, taking into account the loss of free water - 9.5 wt.%. The adsorption characteristics of the analyzed bentonite were studied using "model" pollutants – nickel (II) cations and methylene blue dye. It was found that the adsorption isotherm of nickel (II) ions belongs to class L type 3, and the adsorption isotherm of methylene blue belongs to class L type 2 according to the Gils classification. The results of the study showed that bentonite clay from the Nalchik deposit is capable of purifying wastewater to the maximum permissible concentration of cationic pollutants.

Objectives: to investigate the material composition and adsorption properties of bentonite clay from the Nalchik deposit.

Methods. To determine the elemental, phase and granulometric composition, the following equipment was used: transmission electron microscope JEM-2100 (Jeol, Japan), diffractometer Ultima IV (Rigaku, Japan), combined analyzer TG/DTG/DTA SDT Q600 (TA Instruments, Inc., USA), particle size analyzer Microtrac S3500 (USA), as well as laboratory instruments and reagents.

Results. The mineralogical composition of the clay sample from the Nalchik deposit was established; the mass content of montmorillonite was determined. The granulometric composition was studied. The adsorption processes of the clay sample in relation to the organic dye methylene blue and nickel (II) ions were investigated.

Conclusions. The mineralogical composition of the clay sample from the Nalchik deposit was determined: montmorillonite, clinoptilolite and low-temperature trigonal quartz. The montmorillonite content is 53.0 ± 1.1 wt.%. The maximum particle size of the fraction in the studied clay sample is 198.7-210.1 μm , the proportion of such particles is 0.69 wt.%. The minimum particle size of the fraction is 0.6-0.9 μm , the proportion of particles is 1.22 wt.%. The adsorption processes of the clay sample in relation to the organic dye methylene blue and nickel (II) ions were studied. It was shown that the clay of the Nalchik deposit is capable of purifying wastewater from the specified cationic pollutants to the regulatory requirements.

Keywords: bentonite clays, adsorption, adsorbents, heavy metals, wastewater

For citation: Vezentsev A.I., Efendiev B.Sh., Nesterova L.L., Shaidorova G.M., Vyalkin A.A. Bentonite of the Nalchik deposit and the possibilities of its use as a cationic adsorbent. Chemical Bulletin. 2025. 8 (2). 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-2

The article was submitted: January 12, 2025; Approved after reviewing: March 16, 2025; Accepted for publication: May 19, 2025.

Введение

Тяжёлые металлы в ионной форме и органические поллютанты – в настоящее время самые распространённые загрязнители сточных вод. Сточные воды, образующиеся в результате различных процессов производства, несут с собой множество загрязняющих компонентов, как неорганического (например, ионы тяжелых металлов, такие как Hg(II), Pb(II), Ni(II), Sn(II), Cr(III), As(III) и др.), так и органического происхождения [1]. Они, в свою очередь, загрязняют верхние слои земной коры, гидросферу и атмосферу, что приводит к значительным ущербам для окружающей среды, угрожает здоровью и популяции всего живого мира на планете, в т.ч. человечеству. Многие тяжелые металлы накапливаются в живых организмах, приводя к различным серьезным заболеваниям [2, 3].

Проблема очистки сточных вод не нова и для ее решения используют множество методов и реагентов [4, 5]. Но наиболее конкурентоспособный метод – адсорбция вредных веществ на большой дисперсионной поверхности бентонитов, которые представляют собой глины, состоящие не менее, чем на 60-70 масс.% из минералов группы монтмориллонита, обладающие высокой адсорбционной и каталитической активностью [6, 7]. Бентониты в России относятся к дефицитным видам минерального сырья [8]. Тем более интересна задача исследования бентонитов Нальчикского месторождения Кабардино-Балкарской республики, которое находится в Терском прогибе в карбонатно-

глинистой палеоцен-эоценовой формации. Это месторождение содержит в основном щелочно-щелочно-земельные бентониты, представленные Са-Mg-Na-монтмориллонитом и пригодны для производства буровых и формовочных глинопопорошков и высококачественных адсорбентов [9, 10].

В Белгородской области актуально проведение очистных работ сточных вод по снижению содержания ионов никеля (II), источником которых здесь являются хромникелевые сплавы в виде буров и свёрл, производимые и используемые крупнейшей стоматологической клиникой «ВладМиВа».

Цель работы: исследование вещественного состава и адсорбционных свойств бентонитовой глины Нальчикского месторождения.

Материалы и методы исследований

Для определения элементного, фазового и гранулометрического состава, применялось следующее оборудование: просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100 (Jeol, Япония), дифрактометр Ultima IV (Rigaku, Япония), совмещенный анализатор ТГ/ДТГ/ДТА SDT Q600 (TA Instruments, Inc., США), анализатор размера частиц Microtrac S3500 (США), а также приборы и реактивы лабораторного назначения.

Результаты и обсуждения

Химический состав образцов глины Нальчикского месторождения установлен методом энергодисперсионного анализа (рис. 1).

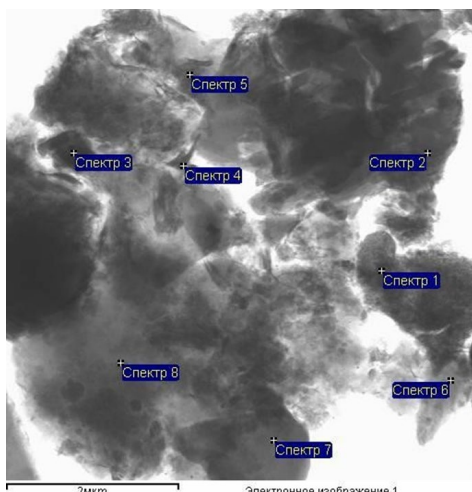


Рис. 1. Структурно-морфологические характеристики образца глины Нальчикского месторождения и точки определения химического состава.

Fig. 1. Structural and morphological characteristics of a clay sample from the Nalchik deposit and points for determining the chemical composition.

Анализ элементного состава показал, что в исследуемом образце глин присутствуют следующие химические элементы: В (следовые количества), Al, Si, K, Ca, Ti, Fe; кремний присутствует во всех спектрах (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав глины Нальчикского месторождения.

Table 1

Chemical composition of clay from the Nalchik deposit.

Спектр	Si	Ti	Fe	Al	Ca	K
	масс., %					
Спектр 1	68.84	26.62	4.54			
Спектр 2	87.87			10.91	1.22	
Спектр 3	28.94		6.49	8.29	56.28	
Спектр 4	82.34		14.87		2.79	
Спектр 5	78.47		2.62	18.91		
Спектр 6	74.97		4.52	17.54		2.97
Спектр 7	3.53				96.47	
Спектр 8	88.63		3.40			7.98

Минералогический состав определён методом рентгенофазового анализа (РФА) при интерпретации рентгеновских порошковых дифрактограмм (рис. 2).

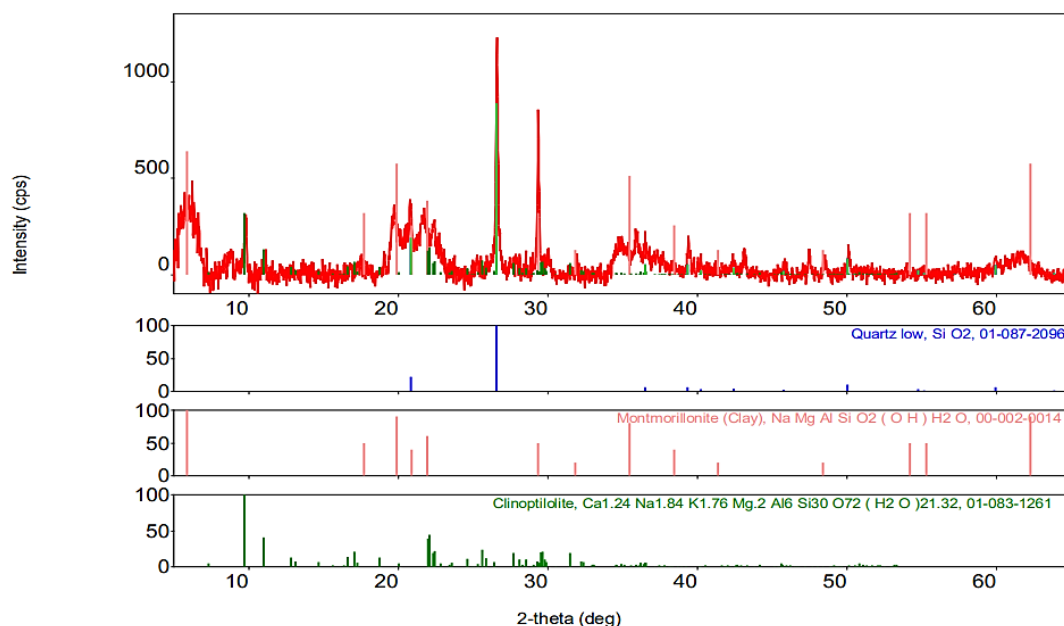


Рис. 2. Рентгеновская порошковая дифрактограмма образца глины Нальчикского месторождения.

Fig. 2. X-ray powder diffraction pattern of a clay sample from the Nalchik deposit.

Рентгенофазовый анализ (рис. 2) образца выявил сложный полиминеральный состав, включающий три основные кристаллические фазы: монтмориллонит (основные рефлексы при d , Å: 14.8, 4.52, 4.1, 3.96, 2.98, 2.57, 1.50); клиноптилолит (характерные пики при d , Å: 8.97, 3.55, 3.23, 2.8, 2.60, 2.41, 1.92); низкотемпературный тригональный кварц (дифракционные максимумы при d , Å: 4.25, 3.35, 2.49, 2.29, 2.13, 1.99, 1.82, 1.54). Количественный анализ содержания монтмориллонитовой фазы был выполнен методом адсорбционно-люминесцентного анализа в соответствии с требованиями ГОСТ 28177-89. Установлено, что массовая доля монтмориллонита составляет $53.0 \pm 1.1\%$, что подтверждает его доминирующую роль в минеральном составе исследуемого образца [11, 12].

На рис. 3 представлены термоаналитические кривые исследуемого образца, полученные методом совмещенного термогравиметрического (ТГ) и дифференциально-термического анализа (ДТА). Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программного обеспечения OriginPro2015, с последующей идентификацией характерных температурных областей и соответствующих потерь массы [13]. Анализ кривой ДТА

выявил четыре характерных эндотермических перехода:

- низкотемпературная область (25-200°C): десорбция свободной межслоевой воды сопровождается потерей массы 7.0%; температурный максимум эффекта соответствует 85-120°C;

- среднетемпературная область I (200-550°C): удаление остаточной адсорбционной воды включает дегидратацию цеолитной и кристаллизационной воды; массопотеря составляет 4.0%, пиковая температура в диапазоне 300-450°C;

- среднетемпературная область II (550-750°C): дегидроксиляция структурных гидроксильных групп обусловлена потерей основной части конституционной воды, фиксируемая потеря массы – 5.0%, максимум эффекта наблюдается при 650-700°C;

- высокотемпературная область (750-1000°C): завершающая стадия дегидроксиляции сопровождается полным разрушением кристаллической решетки монтмориллонита, массопотеря составляет 0.5%, пик деструкции наблюдается при 850-900°C.

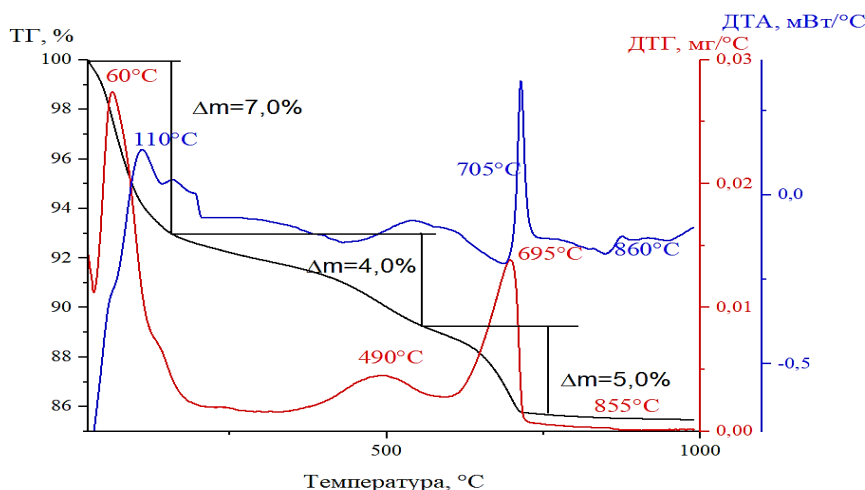


Рис. 3. Комплексная термограмма образца глин Нальчикского месторождения.
Fig. 3. Complex thermogram of a clay sample from the Nalchik deposit.

Таким образом, суммарная потеря массы при прокаливании (ППП) образца составила 16.5 %. Если убрать потери свободной воды, то ППП составит 9.5 масс. %.

Исследование гранулометрического состава

позволило установить, что анализируемый образец глины Нальчикского месторождения имеет неравномерное распределение частиц по размеру (рис. 4).

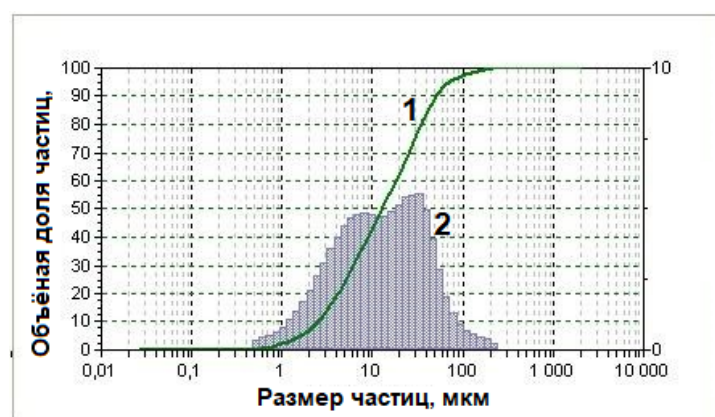


Рис. 4. Распределение частиц по размеру в образце глины Нальчикского месторождения: 1 – интегральная кривая; 2 – дифференциальная гистограмма.
Fig. 4. Particle size distribution in a clay sample from the Nalchik deposit: 1 – integral curve; 2 – differential histogram.

Максимальный размер частиц в исследуемом образце глины составляет 198.74-210.13 мкм, доля таких частиц – 0.69 масс. %. Минимальный размер частиц 0.63-0.92 мкм, доля таких частиц – 1.22 масс. %.

Определение адсорбционных свойств анализируемого образца глины исследовали при помощи «модельных» катионных загрязнителей. В качестве ионов тяжелого металла использовали соль Ni

(II) [14, 15]. Для оценки адсорбционных характеристик также применяли метод с использованием органического красителя метиленового голубого, так как он является стандартным и утвержден российскими и зарубежными нормативными документами [16, 17].

На рис. 5. представлены кинетические кривые поглощения катионного красителя метиленового голубого (МГ) и ионов Ni (II).

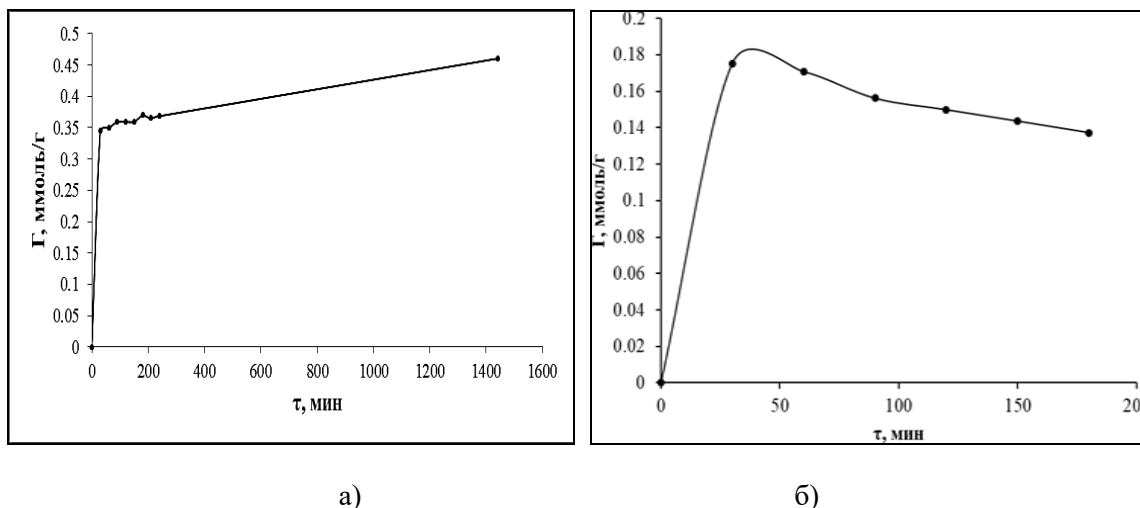


Рис. 5. Kinetic absorption curves: a) MG; b) Ni (II) ions.
Fig. 5. Kinetic absorption curves: a) MG; b) Ni (II) ions.

По результатам анализа выявлено, что поглощение МГ наиболее интенсивно протекает в первые 60 минут с последующим затуханием процесса адсорбции; течение адсорбции ионов Ni (II) наиболее интенсивно протекает в первые 30 минут с последующим затуханием.

Кинетические исследования сорбционных процессов позволили установить следующие закономерности:

- для метиленового голубого максимальная скорость адсорбции наблюдается в течение первых 60 минут эксперимента; последующее экспо-

ненциальное снижение скорости процесса свидетельствует о постепенном достижении квазиравновесного состояния;

- для ионов никеля (Ni^{2+}) максимальная адсорбционная активность наблюдается в первые 30 минут контакта раствора с адсорбентом; более быстрое достижение стадии кинетического торможения по сравнению с МГ указывает на различия в механизмах адсорбции.

На рис. 6, 7 приведены кривые по описываемым моделям для адсорбции МГ и ионов Ni (II).

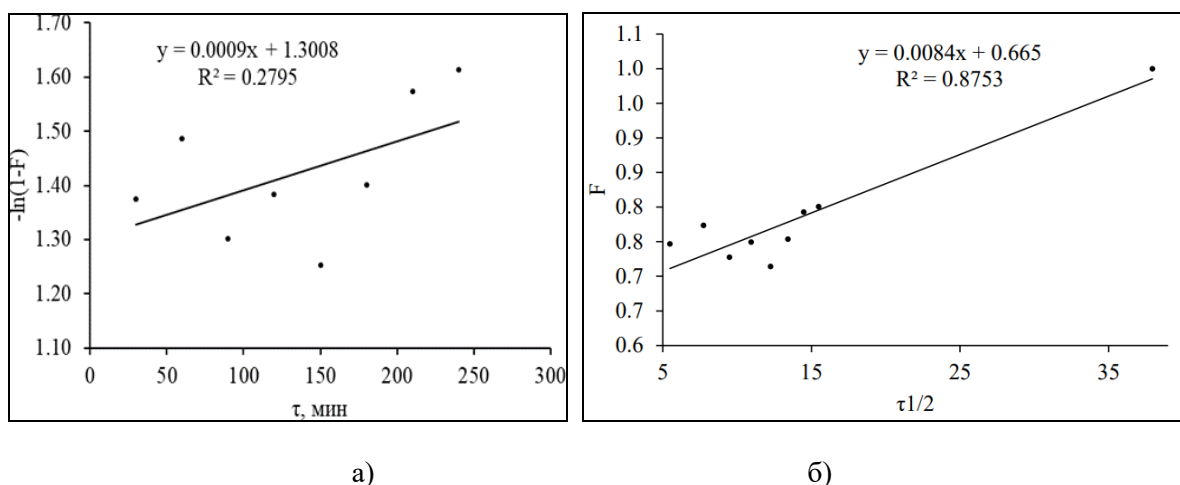


Рис. 6. Лимитирование процесса адсорбции МГ: а) внешнеллифузионное; б) внутриллифузионное.
Fig. 6. Limitation of the MG adsorption process: a) external diffusion; b) internal diffusion.

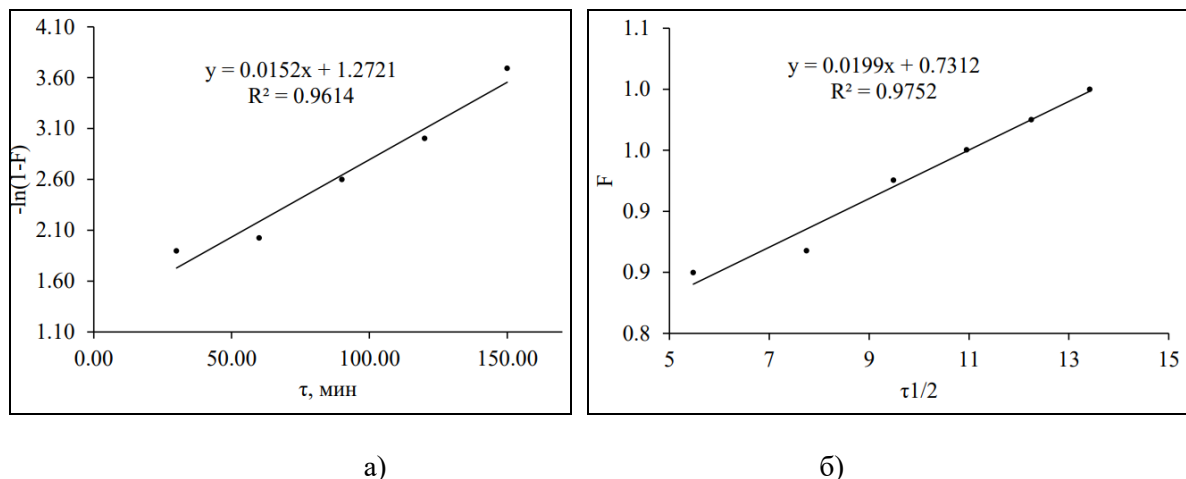


Рис. 7. Лимитирование процесса адсорбции ионов Ni (II): а) внешнедиффузионное; б) внутридиффузионное.

Fig. 7. Limitation of the adsorption process of Ni (II) ions: a) external diffusion; b) internal diffusion.

Анализ средневквadraticных отклонений процесса адсорбции метиленового голубого (0.2795 и 0.8753) позволяет сделать вывод о преимущественно внутридиффузионном механизме протекания процесса. В случае адсорбции ионов никеля(II) близкие значения средневквadraticных отклонений, полученные для обеих моделей (0.9614 и 0.9752), указывают на смешаннодиффузионный характер процесса, включающий как внутридиффузионные, так и внешнедиффузионные стадии.

Выявлено, что для описания кинетики поглощения красителя МГ целесообразно при помощи модели псевдо-второго порядка, для описания сорбции ионов никеля – псевдо-первого и псевдо-второго порядков.

В табл. 2 представлены значения параметров уравнений изотерм адсорбции МГ и ионов Ni(II) по моделям Фрейндлиха и Ленгмюра [19, 20].

Таблица 2
Кинетические параметры в уравнениях используемых моделей для изотерм адсорбции МГ и ионов Ni (II) ($T=25^{\circ}\text{C}$).

Table 2
Kinetic parameters in the equations of the models used for the adsorption isotherms of MG and Ni (II) ions ($T=25^{\circ}\text{C}$).

Используемая модель	Параметр	Значение параметра
МГ		
Фрейндлих	n	7.32
	K	1.98
	R^2	0.8070
Ленгмюр	Γ_{max} , ммоль/г	0.34
	K, л/ммоль	7268.00
	R^2	0.4830
	ΔG , кДж/моль	-49.09
Ионы Ni (II)		
Фрейндлих	n	1.39
	K	3.95
	R^2	0.9381
Ленгмюр	Γ_{max} , ммоль/г	0.73
	K, л/ммоль	1.91
	R^2	0.9481
	ΔG , кДж/моль	-28.66

Таким образом, для описания сорбционных процессов на образцах глин Нальчикского месторождения целесообразно применение следующих моделей:

– в случае адсорбции красителя МГ наиболее адекватное описание процесса с учётом предельной адсорбции обеспечивает модель Фрейндлиха;

– для описания адсорбции с учётом предельной адсорбции могут быть использованы как модель Фрейндлиха, так и модель Ленгмюра.

Изотерма адсорбции метиленового голубого (МГ) соответствует классу L, тип 2 (классификация Гильса), что указывает на преобладание неспецифических (физических) взаимодействий между адсорбатом и адсорбентом. Анализ коэффициентов детерминации позволяет заключить, что ни одна из применённых моделей не обеспечивает полного описания процесса адсорбции МГ на исследуемом образце. В случае адсорбции ионов никеля (II) изотерма относится к классу L, тип 3 (классификация Гильса), что может свидетельствовать о протекании полимолекулярной адсорбции, а также возможной переориентации или

ассоциации молекул на поверхности адсорбента. На основании значений коэффициентов детерминации можно сделать вывод о том, что модель Ленгмюра демонстрирует наилучшее соответствие экспериментальным данным, описывая сорбцию ионов никеля (II) на данном образце.

Выводы

Установлен минералогический состав образца глины Нальчикского месторождения: монтмориллонит, клиноптилолит и низкотемпературный тригональный кварц. Содержание монтмориллонита составляет 53.0 ± 1.1 масс. %.

Максимальный размер частиц фракции в исследуемом образце глины – 198.7–210.1 мкм, доля таких частиц – 0.69 масс. %. Минимальный размер частиц фракции 0.6–0.9 мкм, доля частиц – 1.22 масс. %.

Исследованы адсорбционные процессы образца глины по отношению к органическому красителю метиленовому голубому и ионам никеля (II).

Показано, что глина Нальчикского месторождения способна отчистить сточные воды от указанных катионных загрязнителей до нормативных требований.

Список источников

1. Sharma P., Pandey A.K., Kim S.H., Singh S.P., Chaturvedi P., Varjani S. Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 24. 101826. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101826>
2. Fu Z., Xi S. The effects of heavy metals on human metabolism // *Toxicology mechanisms and methods*. 2020. Vol. 30. № 3. P. 167 – 176. <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>
3. Showkat A., Bhat S.A., Hassan T., Majid S. Heavy metal toxicity and their harmful effects on living organisms—a review // *International Journal of Medical Science And Diagnosis Research*. 2019. Vol. 3. № 1. P. 106 – 122. <https://doi.org/10.32553/JMSDR>
4. Afolalu S.A., Ikumapayi O.M., Ogedengbe T.S., Kazeem R.A., Ogundipe A.T. Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods—An overview // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. P. 3282 – 3288. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.231>
5. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment // *Environmental Chemistry Letters*. 2019. Vol. 17. P. 145 – 155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
6. Чеченов А.А., Куршаева Ф.М. Особенности природопользования в Кабардино-Балкарской республике // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2009. № 1. С. 7 – 13.
7. Dhar A.K., Himu H.A., Bhattacharjee M., Mostufa M.G., Parvin F. Insights on applications of bentonite clays for the removal of dyes and heavy metals from wastewater: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30 (3). P. 5440 – 5474. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24277-x>
8. Сабитов А.А., Лыгина Т.З., Аксаментов Е.В., Мирошников К.Е., Руселик Е.С., Трофимова Ф.А., Зайнуллин И.И., Тетерин А.Н. Bentonites Северного Кавказа и перспективы их освоения // *Отечественная геология*. 2009. № 4. С. 46 – 53.
9. Беляев Е.В. Неметаллические полезные ископаемые Северного Кавказа // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2020. № 4-5 (173). С. 23 – 37.
10. Беляев Е.В. Минералогия Северного Кавказа // *Разведка и охрана недр*. 2023. № 2. С. 29 – 39.
11. Holtzer M., Bobrowski A., Grabowska B. Montmorillonite: a comparison of methods for its determination in foundry bentonites // *Metalurgija*. 2011. Vol. 50 (2). P. 119 – 122.

12. García-Romero E., María Manchado E., Suárez M., García-Rivas J. Spanish bentonites: a review and new data on their geology, mineralogy, and crystal chemistry // *Minerals*. 2019. Vol. 9 (11). 696. P. 1 – 31. <https://doi.org/10.3390/min9110696>
13. Kabdrakhmanova S.K., Kerimkulova A.Z., Nauryzova S.Z., Aryp K., Shaimardan E., Kukhareva A.D., Kantay N., Beisebekov M.M., Thomas S. Bentonite-Based Composites in Medicine: Synthesis, Characterization, and Applications // *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9 (6). 310. P. 1 – 25. <https://doi.org/10.3390/jcs9060310>
14. Gafoor A., Kumar S., Begum S., Rahman Z. Elimination of nickel (II) ions using various natural/modified clay minerals: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37. P. 2033 – 2040. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.500>
15. Mohammadtaghi V., Mohd R., Jing Y., Haider M.Z., Amin M., Zahra G., Fatemeh G., Wei W., Abdulmoseen S.G., Youqing Y., Giovanni C., Gang Yu. Nickel ion removal from aqueous solutions through the adsorption process: a review // *Reviews in Chemical Engineering*. 2021. Vol. 37. No. 6. P. 755 – 778. <https://doi.org/10.1515/revce-2019-0047>
16. Jock A.A., Zaini M.A.A., Surajudeen A., Aliyu El-N.U., Omeiza A.U. Surface modification of low-cost bentonite adsorbents – A review // *Particulate Science and Technology*. 2019. Vol. 37 (5). P. 538 – 549. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1438548>
17. Fendi W.J., Al-Dulaimy Z.A., Jadoo S.A., Hassan D.F. Adsorption of Methylene Blue from Their Aqueous Solution // *International Journal of Special Education*. 2022. Vol. 37 (3). P. 16399 – 16407. <https://doi.org/10.2166/WST.2016.510>
18. Musah M., Azeh Y., Mathew J.T., Umar M.T., Abdulhamid Z., Muhammad A.I. Adsorption kinetics and isotherm models: a review // *CaJoST*. 2022. Vol. 4 (1). P. 20 – 26. <https://doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>
19. Girish C.R. Various isotherm models for multicomponent adsorption: A review // *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2017. Vol. 8 (10). P. 80 – 86.
20. Kalam S., Abu-Khamsin S.A., Kamal M.S., Patil S. Surfactant adsorption isotherms: A review // *ACS omega*. 2021. Vol. 6 (48). P. 32342 – 32348. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00631-0>

References

1. Sharma P., Pandey A.K., Kim S.H., Singh S.P., Chaturvedi P., Varjani S. Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 24. 101826. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101826>
2. Fu Z., Xi S. The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology mechanisms and methods*. 2020. Vol. 30. No. 3. P. 167 – 176. <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>
3. Showkat A., Bhat S.A., Hassan T., Majid S. Heavy metal toxicity and their harmful effects on living organisms—a review. *International Journal of Medical Science And Diagnosis Research*. 2019. Vol. 3. No. 1. P. 106 – 122. <https://doi.org/10.32553/JMSDR>
4. Afolalu S.A., Ikumapayi O.M., Ogedengbe T.S., Kazeem R.A., Ogundipe A.T. Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods—An overview. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. P. 3282 – 3288. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.231>
5. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 2019. Vol. 17. P. 145 – 155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
6. Chechenov A.A., Kurshaeva F.M. Features of nature management in the Kabardino-Balkarian Republic. *Sustainable development of mountain territories*. 2009. No. 1. P. 7 – 13.
7. Dhar A.K., Himu H.A., Bhattacharjee M., Mostufa M.G., Parvin F. Insights on applications of bentonite clays for the removal of dyes and heavy metals from wastewater: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30 (3). P. 5440 – 5474. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24277-x>
8. Sabitov A.A., Lygina T.Z., Aksamentov E.V., Miroshnikov K.E., Ruselik E.S., Trofimova F.A., Zainullin I.I., Teterin A.N. Bentonites of the North Caucasus and Prospects for Their Development. *Domestic Geology*. 2009. No. 4. P. 46 – 53.
9. Belyaev E.V. Non-metallic minerals of the North Caucasus. *Mineral resources of Russia. Economy and management*. 2020. No. 4-5 (173). P. 23 – 37.
10. Belyaev E.V. Minerageny of the North Caucasus. *Exploration and protection of mineral resources*. 2023. No. 2. P. 29 – 39.
11. Holtzer M., Bobrowski A., Grabowska B. Montmorillonite: a comparison of methods for its determination in foundry bentonites. *Metalurgija*. 2011. Vol. 50 (2). P. 119 – 122.

12. García-Romero E., María Manchado E., Suárez M., García-Rivas J. Spanish bentonites: a review and new data on their geology, mineralogy, and crystal chemistry. *Minerals*. 2019. Vol. 9 (11). 696. P. 1 – 31. <https://doi.org/10.3390/min9110696>
13. Kabdrakhmanova S.K., Kerimkulova A.Z., Nauryzova S.Z., Aryp K., Shaimardan E., Kukhareva A.D., Kantay N., Beisebekov M.M., Thomas S. Bentonite-Based Composites in Medicine: Synthesis, Characterization, and Applications. *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9 (6). 310. P. 1 – 25. <https://doi.org/10.3390/jcs9060310>
14. Gafoor A., Kumar S., Begum S., Rahman Z. Elimination of nickel (II) ions using various natural/modified clay minerals: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37. P. 2033 – 2040. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.500>
15. Mohammadtaghi V., Mohd R., Jing Y., Haider M.Z., Amin M., Zahra G., Fatemeh G., Wei W., Abdulmoseen S.G., Youqing Y., Giovanni C., Gang Yu. Nickel ion removal from aqueous solutions through the adsorption process: a review. *Reviews in Chemical Engineering*. 2021. Vol. 37. No. 6. P. 755 – 778. <https://doi.org/10.1515/revce-2019-0047>
16. Jock A.A., Zaini M.A.A., Surajudeen A., Aliyu El-N.U., Omeiza A.U. Surface modification of low-cost bentonite adsorbents – A review. *Particulate Science and Technology*. 2019. Vol. 37 (5). P. 538 – 549. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1438548>
17. Fendi W.J., Al-Dulaimy Z.A., Jadoo S.A., Hassan D.F. Adsorption of Methylene Blue from Their Aqueous Solution. *International Journal of Special Education*. 2022. Vol. 37 (3). P. 16399 – 16407. <https://doi.org/10.2166/WST.2016.510>
18. Musah M., Azeh Y., Mathew J.T., Umar M.T., Abdulhamid Z., Muhammad A.I. Adsorption kinetics and isotherm models: a review. *CaJoST*. 2022. Vol. 4 (1). P. 20 – 26. <https://doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>
19. Girish C.R. Various isotherm models for multicomponent adsorption: A review. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2017. Vol. 8 (10). P. 80 – 86.
20. Kalam S., Abu-Khamsin S.A., Kamal M.S., Patil S. Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS omega*. 2021. Vol. 6 (48). P. 32342 – 32348. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00631-0>

Информация об авторах

Везенцев А.И., доктор технических наук, профессор, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-4432>.
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, vesentsev@bsu.edu.ru

Эфендиев Б.Ш., доктор сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией «Интеллектуальные производственные системы в животноводстве», ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5730-2160>,
Федеральный научный центр Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, beslanefendiev@mail.ru

Шайдорова Г.М., аспирант. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9467-027X>, Белгородский
государственный национальный исследовательский университет, shaydorova@bsu.edu.ru

Нестерова Л.Л., кандидат технических наук, доцент, Югорский государственный университет,
nll55@inbox.ru

Вьялкин А.А., Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
vyalkin@bsuedu.ru

© Везенцев А.И., Эфендиев Б.Ш., Шайдорова Г.М., Нестерова Л.Л., Вьялкин А.А., 2025

Information about the author

Vezentsev A.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-4432>. Belgorod National Research University, vesentsev@bsu.edu.ru

Efendiev B.Sh., Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory "Intelligent Production Systems in Animal Husbandry", ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5730-2160>, Federal Scientific Center Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, beslanefendiev@mail.ru

Shaidorova G.M., Postgraduate Student. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9467-027X>, Belgorod State National Research University, shaydorova@bsu.edu.ru

Nesterova L.L., PhD in Engineering, Associate Professor, Yugra State University, nll55@inbox.ru

Vyalkin A.A., Belgorod State National Research University, vyalkin@bsuedu.ru

© Vezentsev A.I., Efendiev B.Sh., Shaidorova G.M., Nesterova L.L., Vyalkin A.A., 2025