



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/12800

Исследование кинетики сорбции витамина В₁₂ лантан-модифицированным бентонитом

Сабухи Ильич Нифталиев¹, Надежда Яковлевна Мокшина^{2,3},
Максим Сергеевич Игумнов^{1,2✉}, Светлана Егоровна Плотникова¹,
Петр Евгеньевич Белоусов⁴, Ксения Борисовна Ким¹

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия, mi9umnov@yandex.ru✉

²Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина, Елец, Россия

³ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

⁴Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Модификация бентонита осуществлялась насыщением раствором нитрата лантана (0.7 мг/см³), с последующим промыванием и сушкой. Для анализа сорбционных свойств использовались УФ-спектрофотометрия ($\lambda=361$ нм) и расчет статической сорбционной емкости. Кинетика адсорбции моделировалась уравнениями псевдо-первого и псевдо-второго порядка.

Модификация бентонита лантаном значительно улучшила сорбционную способность (до 0.3579 мкмоль/г) и скорость адсорбции. Кинетический анализ показал, что модель псевдо-второго порядка лучше описывает процесс адсорбции как для исходного, так и для модифицированного образцов. Хемосорбционный механизм подтверждается высокой степенью адекватности модели ($R^2 > 0.9999$). Природный бентонит продемонстрировал более низкую сорбционную емкость (0.1159 мкмоль/г) и скорость сорбции.

Цель работы: исследование кинетики сорбции витамина В₁₂ на природном и модифицированном лантаном бентоните, а также анализ механизма адсорбции. Модификация бентонита ионами лантана значительно повышает эффективность сорбции витамина В₁₂. Усовершенствованный сорбент перспективен для применения в биомедицинских и экологических процессах благодаря высокой селективности и сорбционной емкости.

Ключевые слова: сорбция, бентонит, витамин В₁₂, кинетика, лантан.

Для цитирования: Нифталиев С.И., Мокшина Н.Я., Игумнов М.С., Плотникова С.Е., Белоусов П.Е., Ким К.Б. Исследование кинетики сорбции витамина В₁₂ лантан-модифицированным бентонитом // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 1. С. 122-130. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/12800>

Original article

Investigation of the kinetics of vitamin В₁₂ sorption by lanthanum-modified bentonite

Sabukhi I. Niftaliev¹, Nadezhda Ya. Mokshina^{2,3}, Maxim S. Igumnov^{1,2✉},
Svetlana E. Plotnikova¹, Peter E. Belousov⁴, Kseniya B. Kim¹

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, mi9umnov@yandex.ru✉

²Yelets State University named after I.A. Bunin, Yelets, Russian Federation

³Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation



⁴Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. Methods: Bentonite was modified using a lanthanum nitrate solution (0.7 mg/cm³), followed by washing and drying. Sorption characteristics were studied using UV spectrophotometry ($\lambda = 361$ nm) and static sorption capacity calculations. Sorption kinetics were modeled using pseudo-first-order and pseudo-second-order equations.

Results: Lanthanum modification significantly enhanced the sorption capacity (up to 0.3579 $\mu\text{mol/g}$) and adsorption rate. Kinetic analysis indicated that the pseudo-second-order model accurately describes the adsorption process for both natural and modified samples. The chemisorption mechanism was supported by a high model adequacy ($R^2 > 0.9999$). Natural bentonite exhibited lower sorption capacity (0.1159 $\mu\text{mol/g}$) and adsorption rates. Purpose: To investigate the kinetics of vitamin B₁₂ sorption on natural and lanthanum-modified bentonite and analyze the adsorption mechanism.

Conclusions: Lanthanum modification substantially improves the sorption efficiency of bentonite for vitamin B₁₂. The enhanced sorbent is promising for biomedical and environmental applications due to its high selectivity and sorption capacity.

Keywords: sorption, bentonite, vitamin B₁₂, kinetics, lanthanum.

For citation: Niftaliev S.I., Mokshina N.Ya., Igumnov M.S., Plotnikova S.E., Belousov P.E., Kim K.B.. Investigation of the kinetics of vitamin B₁₂ sorption by lanthanum-modified bentonite. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(1): 122-130. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/12800>

Введение

Витамин В₁₂ (цианокобаламин) – водорастворимый витамин, незаменимый для нормального функционирования нервной системы, кроветворения и синтеза ДНК, участвует во многих физиологических процессах, включая формирование и развитие миелиновой оболочки, созревание эритроцитов и синтез нуклеиновых кислот [1-6]. Дефицит В₁₂ может привести к нарушению кроветворения и неврологическим расстройствам [7].

В настоящее время кобаламин производится путем ферментации с использованием различных микроорганизмов. Некоторые штаммы позволяют получать содержание целевого продукта до 56 мг на литр, что в несколько раз меньше товарных концентраций. В связи с этим возникают потребности в эффективных методах выделения и концентрирования витамина из биологических жидкостей и промышленных растворов, особенно в фармацевтической промышленности и при очистке сточных вод.

Наиболее распространенными промышленными методами концентрирования содержания цианокобаламина в объектах анализа являются экстракционные и сорбционные процессы [8, 9]. Так, для

сорбции витамина В₁₂ применяются различные адсорбенты, включая активированный уголь и синтетические смолы [9, 10]. Однако высокая стоимость одних и ограниченная сорбционная емкость других стимулируют поиски более доступных материалов, способных к эффективному захвату молекул цианокобаламина.

В качестве высокоэффективных сорбентов в ряде работ предлагается использовать природные минералы и глины [11-13]. Значительный интерес представляет бентонит – природная глинистая порода, состоящая из минералов группы смектита. Подобные минералы обладают уникальной слоистой структурой с высокой величиной удельной поверхности и потенциалом сорбции благодаря способности к ионному обмену [14, 15]. Эти свойства делают бентонит пригодным для удержания крупных органических молекул, таких, как витамин В₁₂.

Природный бентонит часто требует модификации для улучшения его сорбционных характеристик, в частности, проведения кислотной активации, термической обработки и ионообменного насыщения, позволяющих увеличивать пористость и количество активных центров сорбции [14, 16-18]. Модификация бентонита редкоземельными элементами, такими как

лантан, представляется весьма перспективным методом. Введение ионов лантана в межслоевые пространства бентонита приводит к замене исходных металлоидных ионов на ионы лантана, что, в свою очередь, вызывает изменения межполоскостного расстояния в смектите и сорбционных механизмов [19-20]. В результате улучшаются его адсорбционные свойства, позволяя более эффективно взаимодействовать с различными адсорбатами, включая крупные органические молекулы [21].

Цель работы – исследование кинетических закономерностей и механизма сорбции витамина В₁₂ на модифицированном лантаном бентоните.

Экспериментальная часть

Витамин В₁₂ представляет собой тетрапиррольный комплекс с атомом кобальта в центре, в естественной среде встречается в виде дезоксиаденозилкобаламина и метилкобаламина. Обе формы крайне нестабильны в присутствии света, а стабильной формой витамина В₁₂, которая не встречается в природе, является цианокобаламин [22, 23]. Для проведения исследований использовали природный бентонит месторождения 10-й Хутор, респ. Хакасия. Образец бентонитовой глины предварительно высушивали при температуре 105±5°C в течение нескольких часов до постоянной массы и отделяли целевую фракцию глины ситовым методом с диаметром частиц менее 0.125 мм [24].

Модификация бентонита осуществлялась с применением раствора La(NO₃)₃ с концентрацией 0.7 мг/см³. В раствор нитрата лантана добавляли подготовленную навеску бентонита в соотношении твердой и жидкой фаз 1:100, затем смесь перемешивали при комнатной температуре в течение 60 мин. Модифицированный бентонит промывали дистиллированной водой до удаления остатков реагента и сушили при 105°C до постоянной массы.

В соответствии с методикой [25-27] проведена серия экспериментов, направленных на последовательное выщелачивание (десорбцию) бентонита, с целью определения формы нахождения лантана в его структурной матрице. Исходный образец бентонита массой 5 г подвергался поочередно обработке дистиллированной водой, растворами хлорида магния (1 моль/дм³) и соляной кислоты (10 моль/дм³). Все этапы эксперимента осуществлялись в течение 2 часов.

На первом этапе выщелачивания проводилось промывание бентонита дистиллированной водой, что обеспечивало извлечение слабосвязанных форм лантана, адсорбированных на поверхности минералов, а также находящихся в виде растворимых солей. Вторым этапом заключался в замещении катионов, которые были сорбированы по механизму ионного обмена. На третьем этапе исследовался остаток после обработки кислотой, что позволяло извлекать прочносвязанные соединения лантана, включая формы, находящиеся в кристаллических решетках глинистых минералов.

После завершения всех этапов десорбции оставшийся нерастворимый остаток подвергался дополнительному анализу с целью детектирования содержания в нем металлов и металлоидов, относящихся к не извлекаемым формам. Определение лантана после каждой стадии десорбции проводилось на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой EXPEC 6500, количественное его содержание в нерастворимом остатке контролировали методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре последовательного действия Axios Advanced производства компании PANalytical (Нидерланды).

Для определения сорбционных характеристик бентонитовой глины навеску минерала (0.5 г) помещали в модельный раствор витамина В₁₂ с концентрацией 5 мкг/см³. Контакт сорбента с раствором продолжался до установления равновесия

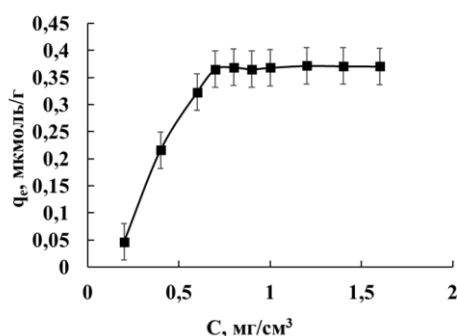


Рис. 1. Зависимость адсорбции от концентрации ионов лантана при солевой обработке
Fig. 1. Dependence of adsorption on the concentration of lanthanum ions during salt treatment

в течение одного часа. Серия экспериментов проводилась при постоянном pH = 6.5 и соотношении сорбента и раствора 1:100. Смеси постоянно перемешивали при температуре 25°C для достижения равновесного состояния.

Остаточную концентрацию витамина B₁₂ в растворе определяли методом УФ-спектрофотометрии при длине волны 361 нм (спектрофотометр Unico 2100). Статическую сорбционную емкость (q_e) рассчитывали по формуле (1):

$$q_e = \frac{C_0 - C}{m} V \quad (1)$$

где q_e – статическая адсорбционная емкость, мкмоль/г; C₀ – исходная концентрация цианокобаламина, мкмоль/см³; C – равновесная концентрация цианокобаламина, мкмоль/см³; V – объем раствора витамина, см³; m – масса глины, г.

Оценка сорбционных характеристик проведена с применением модели кинетики псевдо-первого (2) и псевдо-второго (3) порядков по формулам:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

где q_t – количество адсорбированного вещества на единицу массы сорбента в момент времени t (мкмоль/г), k₁ – константа скорости первого порядка (мин⁻¹), k₂ – константа скорости второго порядка (г/мкмоль·мин), t – время (мин).

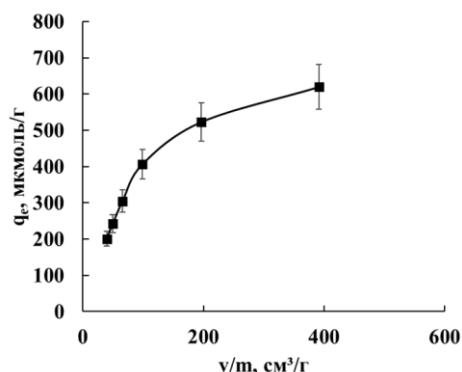


Рис. 2. Зависимость сорбционной емкости витамина B₁₂ от соотношения фаз.
Fig. 2. Dependence of the sorption capacity of vitamin B₁₂ on the phase ratio.

Обсуждение результатов

Изучено влияние концентрации ионов лантана в диапазоне от 0.2 до 1.6 мг/см³ на величину статической адсорбционной емкости бентонитовой глины (рис. 1). С увеличением содержания La³⁺ повышается и величина адсорбции. Максимальная величина сорбции аналита (0.368 мкмоль/г) достигается при концентрации ионов лантана 0.7 мг/см³, дальнейшее ее увеличение, практически, не оказывает влияния на величину сорбции витамина и не является целесообразным.

Влияние соотношения объема сорбируемого раствора цианокобаламина (v) и твердой фазы полученного сорбента (m) на сорбционную емкость приведено на рис. 2. Снижение эффективности сорбции наблюдается только при превышении этого соотношения более чем 1 к 100, поэтому дальнейшие эксперименты проведены при таком соотношении и концентрации раствора лантана при солевой обработке 0.7 мг/см³.

Результаты по десорбции (рис. 3) показали, что 73.01 % лантана находится в прочносвязанной форме, 12.98 % – в ионообменной, 14.00 % – в остаточной

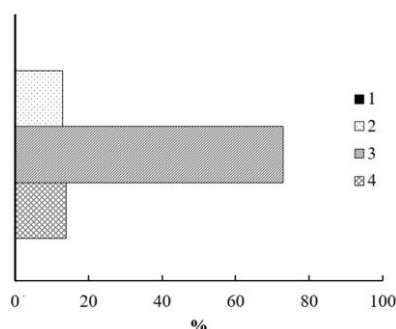


Рис. 3. Распределение различных форм лантана в образце: 1 – слабосвязанная, 2 – ионообменная, 3 – прочносвязанная, 4 – остаточная

Fig. 3. Distribution of various forms of lanthanum in the sample: 1 – weakly bound, 2 – ion-exchange, 3 – strongly bound, 4 – residual

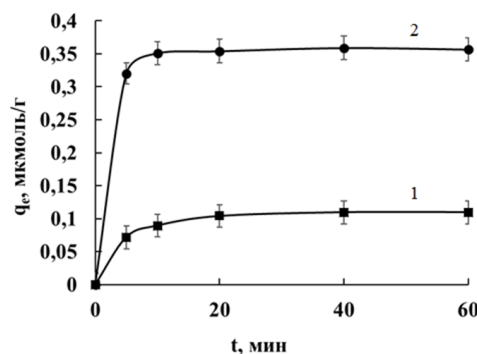


Рис. 4. Кинетические кривые сорбции витамина В₁₂ на бентоните до (1) и после (2) солевой обработки

Fig. 4. Kinetic curves of vitamin B₁₂ sorption on bentonite before (1) and after (2) salt treatment

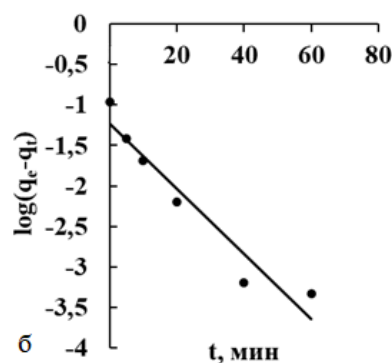
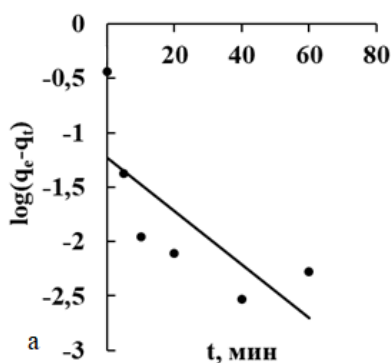


Рис. 5. Модели псевдо-первого порядка для кинетики сорбции обработанного (а) и исходного (б) бентонита.

Fig. 5. Pseudo-first-order models for the sorption kinetics of treated (a) and initial (b) bentonite.

форме и только 0.01% – в слабосвязанной. Полученные значения подтверждают модификацию бентонита лантаном, и то, что лантан находится в межслое смектита, что согласуется с литературными данными [28-30].

Исследование кинетики сорбции витамина В₁₂ показало, что лантаномодифицированный бентонит достигает сорбционного равновесия в два раза быстрее, чем необработанный образец (рис. 4). Это позволяет предположить химическое взаимодействие между сорбентом и молекулами витамина В₁₂, что способствует ускорению процесса адсорбции.

Полученные результаты кинетики сорбции витамина В₁₂ показали различия

в поведении исходного и модифицированного лантаном образцов бентонита. Для описания сорбционного процесса протестированы модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка (рисунки 5, 6). Результаты расчета кинетических кривых сорбции образцов бентонита до и после солевой обработки в координатах моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядков представлены в таблице 1.

Для обработанного бентонита модель псевдо-первого порядка неадекватно описывает экспериментальные данные, что подтверждается низким коэффициентом детерминации ($R^2=0.5568$). Такое несоответствие указывает на то, что процесс сорбции, очевидно, не подчиняется

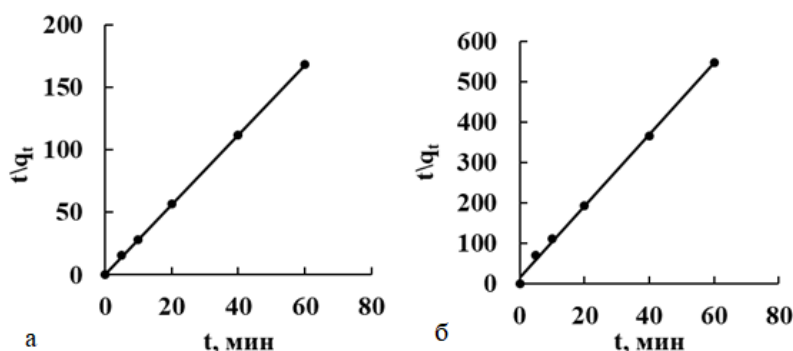


Рис. 6. Модели псевдо-второго порядка для кинетики сорбции обработанного (а) и исходного (б) образца бентонита.

Fig. 6. Pseudo-second-order models for the sorption kinetics of the treated (a) and initial (b) bentonite samples.

Таблица 1. Результаты расчетов кинетических кривых для обработанного и исходного бентонита.

Table 1. Results of calculations of kinetic curves for treated and initial bentonite.

Модель кинетики	Образец	Уравнение аппроксимации	q_e , (мкмоль/г)	K_1 (мин ⁻¹)	R^2
Псевдо-первый порядок	исходный	$y = -0.0401x - 1.228$	0.1102	0.0965	0.9284
	обработанный	$y = -0.0245x - 1.2291$	0.3550	0.2263	0.5568
Псевдо-второй порядок	исходный	$y = 8.8701x + 15.121$	0.1159	2.7355	0.9999
	обработанный	$y = 2.7858x + 0.6893$	0.3579	48.7834	0.9981

простым кинетическим закономерностям из-за сложного механизма, который включает химические взаимодействия между сорбатом и активными центрами, усиленными La^{3+} . Модель псевдо-первого порядка для исходного образца бентонита также показала неудовлетворительные результаты ($R^2=0.9284$). Коэффициент R^2 хотя и выше, чем у модифицированного образца, все же указывает на наличие более сложного механизма сорбции, который не полностью описывается данной моделью (рис. 5).

Модель псевдо-второго порядка продемонстрировала значительно лучшее соответствие экспериментальным данным обоих образцов. Для обработанного лантаном бентонита величина $R^2=0.9999$, что свидетельствует о высоком уровне адекватности модели (рис. 6). Это предполагает, что процесс сорбции в данном слу-

чае контролируется химическим взаимодействием, которое, вероятно, усиливается за счет La^{3+} , замещающих исходные катионы и образующих прочные связи с молекулами витамина B_{12} .

Для исходного образца бентонита также получена высокая степень соответствия модели псевдо-второго порядка ($R^2=0.9980$), следовательно, сорбция протекает по механизму хемосорбции, однако скорость процесса несколько ниже по сравнению с обработанным образцом.

Результаты сорбции витамина B_{12} на модифицированном лантаном бентоните показали, что модификация способствует повышению сорбционной емкости и скорости адсорбции. Высокие значения коэффициента детерминации для модели псевдо-второго порядка могут свидетельствовать о хемосорбционном характере процесса. Согласно [31, 32], в начале, адсорбция витамина B_{12} происходит за счет

образования катионных мостиков на боковых поверхностях смектита, а также, частично, в межслойном пространстве.

Заключение

Проведена сравнительная оценка сорбционных характеристик исходного и модифицированного лантаном бентонита в отношении адсорбции витамина В₁₂ и установлено, что модификация бентонита ионами лантана приводит к значительному улучшению сорбционных свойств природного глинистого минерала. Модифицированный лантаном бентонит показал более высокую сорбционную способность и емкость, что подтверждено высоким коэффициентом детерминации данных, обработанных с применением модели псевдо-второго порядка. Предположительно, адсорбция витамина В₁₂ происходит как на боковых поверхностях смектита, так и, частично, в межслойном пространстве.

Список литературы/References

1. Lupașcu T., Petuhov O., Țîmbaliuc N., Cibotaru S., Rotaru A. Adsorption Capacity of Vitamin B₁₂ and Creatinine on Highly-Mesoporous Activated Carbons Obtained from Lignocellulosic Raw Materials. *Molecules*. 2020; 25: 3095. <https://doi.org/10.3390/molecules25133095>
2. Keith ó Proinsias, Giedyk M., Gryko D. Vitamin B₁₂: Chemical Modifications. *Chem. Soc. Rev.* 2013; 42: 6605-6619. <https://doi.org/10.1039/C3CS60062A>
3. Pardo-Cabello A., Manzano-Gamero V., Puche-Cañas E. Vitamin B₁₂: For More Than Just the Treatment of Megaloblastic Anemia? *Revista Clínica Española*. 2023; 223(2): 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.rceng.2022.11.004>
4. Fedosov S.N., Nexø E., Heegaard C.W. Kinetics of Cellular Cobalamin Uptake and Conversion: Comparison of Aquo/Hydroxocobalamin to Cyanocobalamin. *Nutrients*. 2024; 16(3): 378. <https://doi.org/10.3390/nu16030378>
5. Fidaleo M., Tacconi S., Sbarigia C., Passeri D., Rossi M., Tata A.M., Dini L. Current Nanocarrier Strategies Improve Vitamin B₁₂ Pharmacokinetics, Ameliorate Patients' Lives,

На основании проведенных исследований можно заключить, что лантан-модифицированный бентонит является перспективным сорбентом для адсорбции витамина В₁₂ и других биомолекул благодаря улучшенным сорбционным характеристикам и высокой селективности. Применение редкоземельных элементов позволяет улучшить свойства природных сорбентов и открывает новые возможности для их применения в биомедицинских и экологических процессах очистки и выделения ценных соединений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

and Reduce Costs. *Nanomaterials*. 2021; 11(3): 743. <https://doi.org/10.3390/nano11030743>

6. Ni X., Li Z., Wang Y. Adsorption Characteristics of Anionic Surfactant Sodium Dodecylbenzene Sulfonate on the Surface of Montmorillonite Minerals. *Frontiers in Chemistry*. 2018; 6: Article 390. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00390>
7. Yamini Y., Tahmasebi E., Ranjbar L. Magnetic Nanoparticle-Based Solid-Phase Extraction of Vitamin B₁₂ from Pharmaceutical Formulations. *Biological Trace Element Research*. 2011; 147(1-3): 378-385. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9299-z>
8. Zykov A.V., Korenman Y.I., Mokshina N.Y. Extraction Separation of B-Group Vitamins Using Synthetic Water-Soluble Polymers. *Analytics and Control*. 2011; 15(1): 96-101 (In Russ.).
9. Separation and Purification of Vitamin B₁₂. Available at: <https://www.seplite.com/separation-and-purification-of-vitamin-b12/> (accessed 20 November 2024).
10. Flieger J., Žuk N., Pasieczna-Patkowska S., Flieger M., Panek R., Klepka T., Franus W. Optimization of Cyanocobalamin (Vitamin B₁₂) Sorption onto Mesoporous Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles. *Molecules*. 2024;



- 29(9): 2094. <https://doi.org/10.3390/molecules29092094>
11. Belousov P., Rumyantseva A., Kim K., Pokidko B., Milyutin V., Izosimova Y., Tyupina E. The Use of Natural Filtration Sorbents to Solve the Safety Problems of Industrial Pollution Facilities. *Reliability: Theory & Applications*. 2023; 18(SI5(75): 582-587. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-582-587>
12. Niftaliev S., Peregudov Y., Mokshina N., Mejri R., Saranov I. Effect of Thermal Activation of Glaucanite on Its Moisture and Oil Absorption Capacity. *Ecology and Industry of Russia*. 2019; 23(7): 42-47 (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-7-42-47>
13. Peregudov Y.S., Mejri R., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I. Glaucanite-Based Sorbents for Skimming Oil and Oil Products. *Kondensirovannye Sredy i Mezhhfaznye Granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020; 22(2): 257-265. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2852>
14. Yaghoobi-Rahni S., Rezaei B., Mirghafari N. Bentonite Surface Modification and Characterization for High Selective Phosphate Adsorption from Aqueous Media and Its Application for Wastewater Treatments. *Journal of Water Reuse and Desalination*. 2017; 7(2): 175-186. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.212>
15. Javed I., Al-Sabahi J.N., Nadeem F., Jilani M.I. Adsorption of Dyes Through Bentonite and Zeolite-Based Composite Materials – A Comprehensive Review. *IJCBS*. 2018; 13: 58-69.
16. Krupskaya V., Zakusin S., Tyupina E., Dorzhieva O., Zhukhlistov A., Belousov P., Timofeeva M. Experimental study of montmorillonite structure and transformation of its properties under treatment with inorganic acid solutions. *Mineral*. 2017; 7: 49. <https://doi.org/10.3390/min7040049>
17. Krupskaya V., Novikova L., Tyupina E., Belousov P., Dorzhieva O., Zakusin S., Kim K., Roessner F., Badetti E., Brunelli A., Belchinskaya L. The influence of acid modification on the structure of montmorillonites and surface properties of bentonites. *Appl. Clay Sci*. 2019; 172: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.02.001>
18. Krupskaya V.V., Zakusin S.V., Tyupina E.A., Dorzhieva O.V., Chernov M.S., Bychkova Y.V. Transformation of the montmorillonite structure and its adsorption properties due to the thermochemical treatment. *Geohimia*. 2019; 64(3): 300-319. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016-7525643300-319>
19. Ren W.-X., Chen H.-B. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics Using Response Surface Method. *Engineering Structures*. 2010; 32(8): 2455-2465. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.019>
20. Kuroki V., Bosco G.E., Fadini P.S., Mozeto A.A., Cestari A.R., Carvalho W.A. Use of La(III)-Modified Bentonite for Effective Phosphate Removal from Aqueous Media. *Journal of Hazardous Materials*. 2014; 274: 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.023>
21. Fu C., Zuo Y., Li Y., Li B., Liu C., Liu D., Fu Y., Yin Y. Fabrication of Lanthanum/Chitosan Co-Modified Bentonite and Phosphorus Removal Mechanism from Low-Concentration Landscape Water. *Water Science and Technology*. 2022; 86(5): 1017-1033. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.251>
22. Rucker R.B., Suttie J.W., McCormick D.B., Machlin L.J. Handbook of Vitamins. 3rd ed., New York, 2001, 616 p.
23. Raux E., Schubert H.L., Warren M.J. Biosynthesis of Cobalamin (Vitamin B12): A Bacterial Conundrum. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2000; 57(13-14): 1880-1893. <https://doi.org/10.1007/PL00000670>
24. GOST 21216-2014. Sy`r'e glinistoe. Metody` ispy`tanij : mezhgosudarstvenny`j standart : data vvedeniya 2015-07-01 / Mezhhgosudarstvenny`j sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii. – Izd. oficial`noe. – Moskva : Standartinform, 2015. – 43 p. (In Russ.)
25. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*. 1979; 51(7): 844-851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
26. Andryushchenko N.D., Safonov A.V., Babich T.L., et al. Sorption Characteristics of Filter Barrier Materials in Upper Aquifers Contaminated with Radionuclides. *Radiochemistry*. 2017; 59(4): 361-370 (In Russ.)
27. Kailachakov P.E., Doynikova O.A., Belousov P.E., Vikentyev I.V. A Unique Rhenium Deposit in Carboniferous Coal-Bearing Sands of the Russian Platform. Report 2. Mineralogy of Ores. *Lithology and Mineral Resources*. 2020; 4: 337-370 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024497X20040023>
28. Tian S., Jiang P., Ning P., Su Y. Enhanced Adsorption Removal of Phosphate from

Water by Mixed Lanthanum/Aluminum Pillared Montmorillonite. *Chemical Engineering Journal*. 2009; 151(1-3): 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.02.006>

29. Zhang Y., Zhou F., Wang W., Guo H., Liu M., Zhu H., Sun H. Recyclable Adsorbents Based on Fe₃O₄ Nanoparticles on Lanthanum-Modified Montmorillonite for the Efficient Phosphate Removal. *IET Nanobiotechnology*. 2020; 14(6): 527-536. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2020.0012>

30. Wu M., Zhao M., Li X., Liang J., Xue Y. Montmorillonite-Modified Stabilizing SA/CMC Gel Spheres Cross-Linked by Lanthanum for Tetracycline Hydrochloride Removal. *Journal of*

Water Process Engineering. 2023; 56: 104563. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104563>

31. Akbari Alavijeh M., Nasiri Sarvi M., Ramazani Afarani Z. Properties of Adsorption of Vitamin B12 on Nanoclay as a Versatile Carrier. *Food Chemistry*. 2017; 219: 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.140>

32. Ramazani Afarani Z., Nasiri Sarvi M., Akbari Alavijeh M. Modification of Montmorillonite Nanolayers as a pH-Responsive Carrier of Biomolecules: Delivery of Vitamin B12. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2018; 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.002>

Информация об авторах / Information about the authors

С.И. Нифталиев – заведующий кафедрой неорганической химии и химической технологии, д.х.н., профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

Н.Я. Мокшина – профессор кафедры химико-биологических дисциплин и фармакологии, д.х.н., Елецкий государственный университет имени И.А. Бунина, Елец; профессор кафедры физики и химии ВУНЦ «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

М.С. Игумнов – аспирант кафедры химико-биологических дисциплин и фармакологии, Елецкий государственный университет имени И.А. Бунина, Елец, ассистент кафедры неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

С.Е. Плотникова – доцент кафедры неорганической химии и химической технологии, к.х.н., Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

П.Е. Белоусов – к.г.-м.н., с.н.с., Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

К.Б. Ким – доцент кафедры неорганической химии и химической технологии, к.х.н., Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

S.I. Niftaliev – prof., grand Ph.D. (chemistry), head of the department of inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, e-mail: niftaliev@gmail.com

N.Ya. Mokshina – prof., grand Ph.D. (chemistry), department of chemical-biological disciplines and pharmacology, Bunin Yelets State University, Yelets; prof., Department of Physics and Chemistry of Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation e-mail: moksnad@mail.ru

M.S. Igumnov – the postgraduate student, department of chemical-biological disciplines and pharmacology, Bunin Yelets State University, Yelets; assistant, department of inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, e-mail: mi9umnov@yandex.ru

S.E. Plotnikova – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, e-mail: burkovasweta@yandex.ru

P.E. Belousov – Ph.D., Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: pitbl@mail.ru

K.B. Kim – Ph.D. (chemistry), associate prof., department of inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kmkсениya@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 14.03.2025; принята к публикации 19.03.2025.

The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 14.03.2025; accepted for publication 19.03.2025.