



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13282

Получение композита с рибофлавином на основе природного сорбента

**Анна Михайловна Новицкая, Екатерина Владимировна Юрова,
Екатерина Игоревна Селифонова, Виктор Геннадиевич Сержантов,
Сергей Борисович Вениг, Татьяна Юрьевна Русанова**✉

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия, tatyanaarys@yandex.ru✉

Аннотация. Глауконит – широко распространённый в природе минерал осадочного происхождения. Глаукониты различных месторождений имеют неодинаковый химический состав и различную сорбционную и ионообменную способность. Особенности глауконита Белоозёрского месторождения Саратовской области исследованы мало, хотя оно относится к одному из самых перспективных. Рибофлавин (витамин В2) один из наиболее важных водорастворимых витаминов, кофермент многих биохимических процессов, играющих значимую роль в поддержании здоровья человека. Композиты на основе глауконита и рибофлавина могут стать перспективным сорбентом в животноводстве. Целью настоящей работы является изучение сорбционных характеристик обогащенной фракции глауконита Белоозёрского месторождения Саратовской области по отношению к рибофлавиному и получение биологически активного композита на его основе. Спектрофотометрически определены основные сорбционные характеристики глауконита по отношению к рибофлавиному. С помощью сканирующей электронной микроскопии изучена морфология поверхности зерен глауконита. Выявлено чешуйчатое строение исследуемого сорбента, что значительно увеличивает его сорбционную емкость. В качестве сорбента использовали обогащенную фракцию глауконита Белоозёрского месторождения Саратовской области. Фазовый состав исследуемого глауконита представлен глауконитом, монтмориллонитом, кварцем и полевыми шпатами. Методом магнитной сепарации из исходной глауконитовой руды с содержанием 40% получен 85%-ный концентрат глауконита. Выбран оптимальный pH сорбции рибофлавина на глауконите, рассчитана степень извлечения ($R=91.2\pm 1.9\%$), подобраны время сорбции и масса сорбента. Построена изотерма сорбции, которая аппроксимируется уравнением Ленгмюра. Выявлен мономолекулярный характер адсорбции на поверхности глауконита с участием активных центров как кислотного, так и основного характера. Рассчитаны константа Ленгмюра ($K_L=1.04 \text{ дм}^3/\text{мг}$) и предельная сорбционная ёмкость ($SE=1.03 \text{ мг/г}$). Установлена возможность сорбции глауконитом рибофлавина. Полученные композиты с биологически активными веществами могут быть востребованы в качестве энтеросорбентов в ветеринарии, медицине и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: сорбция, глауконит, рибофлавин, изотерма сорбции, уравнение Ленгмюра.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-23-00519).

Для цитирования: Новицкая А.М., Юрова Е.В., Селифонова Е.И., Сержантов В.Г., Вениг С.Б., Русанова Т.Ю. Получение композита с рибофлавином на основе природного сорбента // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 4. С. 548-555. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13282>

Original article

Obtaining a composite with riboflavin based on a natural sorbent

**Anna M. Novitskaya, Ekaterina V. Yurova, Ekaterina I. Selifonova,
Victor G. Serzhanov, Sergey B. Venig, Tatyana Yu. Rusanova**

N.G. Chernyshevsky Saratov National Research State University, Saratov, Russian Federation, tatyanaarys@yandex.ru✉



Abstract. Glauconite is a widespread mineral of sedimentary origin in nature. Glauconites from different deposits have different chemical compositions and different sorption and ion-exchange capacities. The characteristics of glauconite from the Beloozerskoye deposit in the Saratov region have been little studied, although it is one of the most promising. Riboflavin (vitamin B2) is one of the most important water-soluble vitamins, a coenzyme of many biochemical processes that play a significant role in maintaining human health. Composites based on glauconite and riboflavin can become a promising sorbent in animal husbandry. The aim of this work is to study the sorption characteristics of the enriched fraction of glauconite from the Beloozerskoye deposit in the Saratov region in relation to riboflavin and to obtain a biologically active composite based on it. The main sorption characteristics of glauconite in relation to riboflavin were determined spectrophotometrically. The surface morphology of glauconite grains was studied using scanning electron microscopy. A scaly structure of the sorbent under study was revealed, which significantly increases its sorption capacity. The enriched fraction of glauconite from the Beloozerskoye deposit in the Saratov region was used as a sorbent. The phase composition of the studied glauconite is represented by glauconite, montmorillonite, quartz and feldspars. Using the magnetic separation method, an 85% glauconite concentrate was obtained from the initial glauconite ore with a content of 40%. The optimal pH of riboflavin sorption on glauconite was selected, the degree of extraction was calculated ($R=91.2\pm 1.9\%$), the sorption time and mass of the sorbent were selected. A sorption isotherm was constructed, which is approximated by the Langmuir equation. The monomolecular nature of adsorption on the glauconite surface with the participation of active centers of both acidic and basic nature was revealed. The Langmuir constant ($K_L=1.04$ l/mg) and the maximum sorption capacity ($SC=1.03$ mg/g) were calculated. The possibility of sorption of riboflavin by glauconite was established. The creation of composites with biologically active substances is a promising area of research and is in demand as enterosorbents in veterinary science, medicine and agriculture.

Keywords: sorption, glauconite, riboflavin, isotherm of adsorption, Langmuir equation.

Acknowledgments: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project № 24-23-00519).

For citation: Novitskaya A.M., Yurova E.V., Selifonova E.I., Serzhantov V.G., Venig S.B., Rusanova T.Yu. Obtaining a composite with riboflavin based on a natural sorbent. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2025. 25(4): 548-555. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13282>

Введение

Рибофлавин (витамин В₂) является водорастворимым витамином, в основе которого лежит структура изоаллоксазина, соединённого со спиртом рибитолом [1]. Рибофлавин имеет большое значение в метаболизме белков, жиров и углеводов. Коферменты витамина В₂ входят в состав ферментов, осуществляющих перенос водорода в процессе дыхания, участвующих в синтезе гемоглобина [2-3]. Для извлечения рибофлавина применяются разные методы, среди которых часто используют сорбцию различными по природе материалами [4-8].

Одним из распространённых минералов, применяемых в качестве природного сорбента, является глауконит – водный алюмосиликат переменного состава с общей формулой: $(K, H_2O)(Fe^{3+}, Al, Fe^{2+}, Mg)_2 [Si_3AlO_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$. Глауконит обладает широкими перспективами использования в таких областях, как строительство, экология, медицина, косметология,

сельское хозяйство. Преимущества этого сорбента заключаются в низкой себестоимости, высоких сорбционных характеристиках, нетоксичности, термостойкости, возможности модификации [9].

И рибофлавин, и глауконит находят широкое применение в сельском хозяйстве, в частности, в животноводстве. При недостатке рибофлавина прекращается рост и возникают патологические изменения в разных системах организма, поэтому он особенно востребован для цыплят, поросят, телят и ягнят [10-12]. Глауконит благодаря своим сорбционным свойствам способен выводить токсины, тяжёлые металлы, а также оказывать влияние на усвоение витаминов. Так, добавление глауконита в кормосмеси позволяет повысить интенсивность роста мясной птицы [13]. При его добавлении в рацион дойных коров улучшается качественный состав молока и продуктивность [14]. Поэтому композиты на основе глауконита и рибофлавина могут стать перспективным сорбентом в животноводстве.

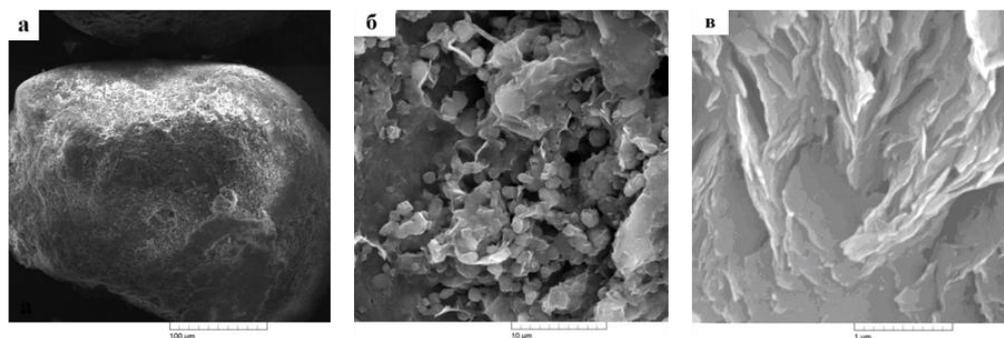


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности зерен обогащённого глауконита Белоозёрского месторождения (ув. а – 1000 раз, б – 10000, в – 100000).

Fig. 1. SEM images of the surface of grains of enriched glauconite from the Beloozersky deposit (zoom: a – x1000, b – x10000, c – x100000).

Таким образом, целью работы является изучение сорбционных свойств глауконита по отношению к рибофлави́ну и получение композита на основе глауконита и рибофлавина, который может найти практическое применение в животноводстве в качестве кормовой добавки.

Экспериментальная часть

В работе в качестве сорбента использовали обогащённую фракцию глауконита Белоозёрского месторождения Саратовской области, характеристики которого ранее подробно описаны [9,15,16]. Содержание глауконита в исходной глауконитовой руде составляло около 40 %. Методом магнитной сепарации получен 85%-ный концентрат глауконита. Фазовый состав исследуемого глауконита представлен глауконитом, монтмориллонитом, кварцем и полевыми шпатами.

В качестве сорбата использовали фармацевтический препарат рибофлавин в виде мононуклеотида (ОАО «Фармстандарт-УфаВИТа», Россия), ампулы с концентрацией 10 мг/см³. Спектры поглощения растворов до и после сорбции регистрировали на двухлучевом спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Япония) в диапазоне 250-550 нм с шагом в 1 нм в кювете на 1 см. Измерение pH среды проводили с помощью pH-метра (Анион 7000, Россия).

Методика иммобилизации рибофлавина на глауконитовую матрицу. Для по-

лучения композита использовали сорбцию в статическом режиме при комнатной температуре. В конические колбы объёмом 100 см³ помещали 0.5 г глауконита, добавляли 25 см³ рабочего раствора рибофлавина ($C=10$ мг/дм³) и перемешивали в течение 45 минут до установления равновесия. pH создавали ацетатно-аммиачными буферными растворами. Далее жидкость отделяли от твердой фазы с использованием фильтровальной бумаги (красная лента). Остаточную концентрацию сорбата ($C_{ост}$) определяли спектрофотометрическим методом, используя предварительно построенный градуировочную зависимость. Для построения изотермы адсорбции рибофлавина использовали концентрации (мг/дм³): 6; 8; 10; 12.5; 15.

Обсуждение результатов

Исследуемый сорбент представляет собой зернистый порошок серо-зеленого цвета. Поверхность зёрен слоистая, пористая и составлена из чешуек различной формы и размеров (рис. 1). Толщина чешуек варьируется от 10 до 100 нм, расстояние между чешуйками составило 10-200 нм. Таким образом, для глауконита Белоозёрского месторождения выявлено наличие обширной адсорбирующей поверхности.

Спектры поглощения водных растворов рибофлавина при pH 3, 5, 7, 9, 11 представлены на рис. 2а. Каждый спектр

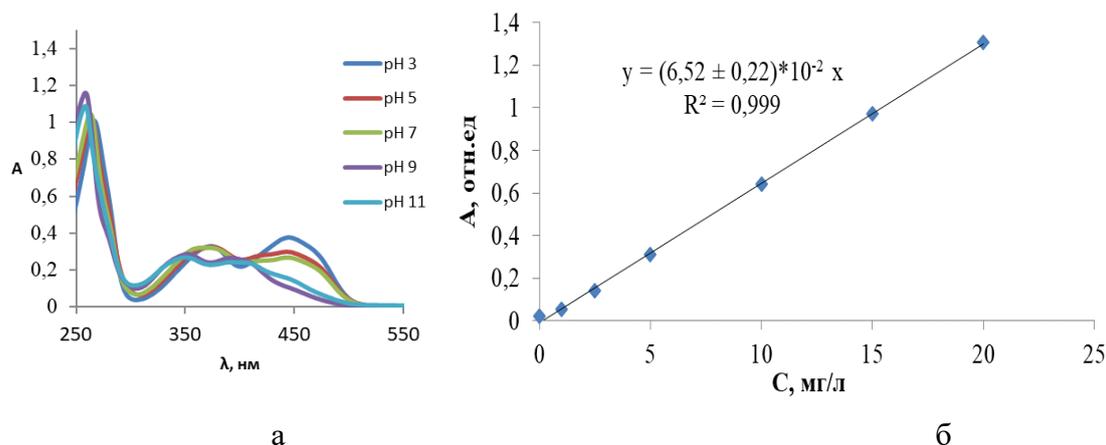


Рис. 2. Спектры поглощения раствора рибофлавина ($C=12.5 \text{ мг/дм}^3$) при различных рН (а) и пример градуировочной зависимости для определения рибофлавина (рН 5, $\lambda=265 \text{ нм}$) (б)
 Fig. 2. Absorption spectra of riboflavin solution ($C=12.5 \text{ mg/dm}^3$) at different рН (а) and calibration curve for riboflavin determining (рН 5, $\lambda=265 \text{ nm}$) (б)

имеет 3 максимума, в нейтральной и слабокислой области – при 267, 373 и 445 нм, с увеличением рН наблюдается небольшой гипохромный сдвиг. Остаточную концентрацию витамина в растворе после сорбции определяли спектрофотометрически по предварительно построенному градуировочному графику в координатах «оптическая плотность - концентрация» при 267 нм (пример показан на рис. 2б).

Выбор оптимального значения рН сорбции. Спектры поглощения рибофлавина до и после сорбции на примере рН 3 представлены на рисунке 3. Величины степеней извлечения при разных рН представлены в табл. 1.

Степень извлечения рибофлавина из раствора рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{ост}})}{C_{\text{исх}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$ и $C_{\text{ост}}$ – исходная и остаточная концентрации сорбата, мг/дм^3 .

Исходя из средних значений степени извлечения, представленных в таблице 1, для проведения сорбции был выбран ацетатно-аммиачный буфер с рН 5, который обеспечивает степень извлечения $91.2 \pm 1.9\%$.

Подбор оптимального времени сорбции. Для определения оптимального вре-

мени сорбции регистрировали спектры поглощения рибофлавина до сорбции и в процессе сорбции в течении 120 мин (рис.4).

Установлено оптимальное время для получения композита – 60 минут, поскольку более длительный контакт сорбата с сорбентом не дает большее извлечение биологически активного вещества на глауконитовую матрицу.

Подбор массы сорбента. Для определения оптимальной массы сорбента провели сорбцию с разными навесками глауконита и зарегистрировали спектры поглощения. Рассчитанные по формуле (1) степени извлечения представлены в таблице 2. Из полученных значений видно, что степень извлечения при массе 0.5 и 0.75 г сорбента наибольшая и практически одинакова. Для эксперимента была выбрана масса сорбента 0.5 г. Сорбционную ёмкость ($СЕ$, мг/г) глауконитовой матрицы рассчитывали по формуле:

$$СЕ = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{ост}}) \cdot V}{m}, \quad (2)$$

где V – объём раствора, см^3 ; m – масса сорбента, г.

Значения $СЕ$ по отношению к рибофлави́ну (из раствора с концентрацией $C=12.5 \text{ мг/дм}^3$) на глауконите составило 0.67 мг/г .

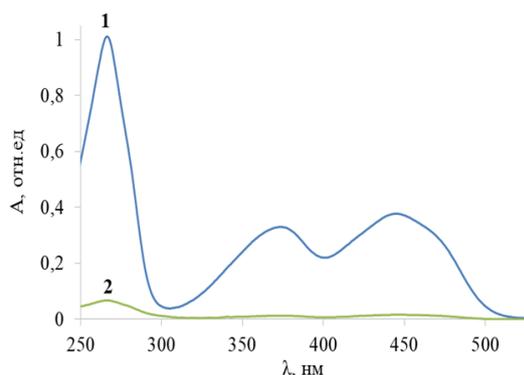


Рис. 3. Спектры водного раствора рибофлавина ($C=12.5 \text{ мг/дм}^3$) до (1) и после (2) сорбции на глауконите при $\text{pH}=3$
 Fig. 3. Spectra of an aqueous solution of riboflavin ($C=12.5 \text{ mg/l}$) before (1) and after (2) sorption at $\text{pH}=3$

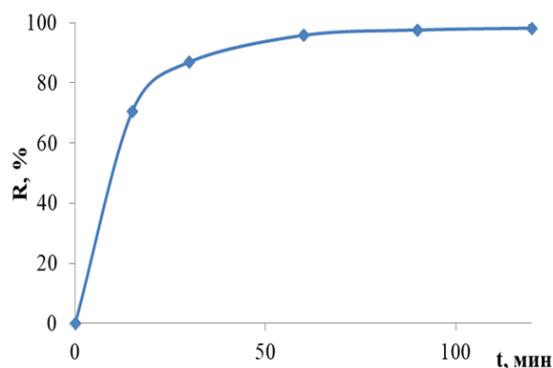


Рис. 4. Зависимость степени извлечения рибофлавина ($C=12.5 \text{ мг/дм}^3$) глауконитом от времени
 Fig. 4. – Dependence of the degree of extraction of riboflavin ($C=12.5 \text{ mg/l}$) by glauconite on time

Таблица 1. Степень извлечения рибофлавина ($C=12.5 \text{ мг/дм}^3$) в зависимости от pH
 Table 1. Degree of extraction of riboflavin ($C=12.5 \text{ mg/l}$) in dependence of pH

pH	Степень извлечения, $R, \%$
3	89 ± 2
5	91.2 ± 1.9
7	79.8 ± 1.1
9	72 ± 7
11	30 ± 10

Таблица 2. Степень извлечения рибофлавина ($C=12.5 \text{ мг/дм}^3$) при разных массах сорбента
 Table 2. Degree of extraction of riboflavin ($C=12.5 \text{ mg/l}$) at different sorbent masses

Масса сорбента, г	$R, \%$
0.1	62.1 ± 0.7
0.25	83.1 ± 1.1
0.5	91.3 ± 0.5
0.75	91.5 ± 0.6

Построение изотермы адсорбции. Далее при выбранном pH 5, времени сорбции 60 мин и массе сорбента 0.5 г получали изотерму сорбции, варьируя концентрацию рибофлавина: 6; 8; 10; 12.5; 15 мг/дм^3 (рис. 5). Данную изотерму можно отнести к изотерме Ленгмюра, что свидетельствует о мономолекулярном характере сорбции в этом диапазоне концентраций рибофлавина. На изотерме можно заметить плавный рост в области малых концентраций, что свидетельствует о постепенном взаимодействии адсорбат – адсорбент.

Полученная зависимость аппроксимируется уравнением Ленгмюра и имеет вид:

$$CE = CE_{\infty} \cdot \frac{K_L \cdot C_{\text{равн}}}{K_L \cdot C_{\text{равн}} + 1}, \quad (3)$$

где CE_{∞} – предельная мономолекулярная адсорбция, мг/г ; $C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация реагента в растворе, мг/дм^3 ; K_L – константа адсорбционного равновесия, $\text{дм}^3/\text{мг}$.

Для расчёта предельной мономолекулярной адсорбции и значения константы адсорбционного равновесия представим уравнение Ленгмюра в линейном виде (рис. 6):

$$\frac{1}{CE} = \frac{1}{CE_{\infty}} + \frac{1}{CE_{\infty} \cdot K_L} \cdot \frac{1}{C_{\text{равн}}}.$$

В ходе решения уравнения Ленгмюра в линейной форме определили константу адсорбционного равновесия K_L , которая

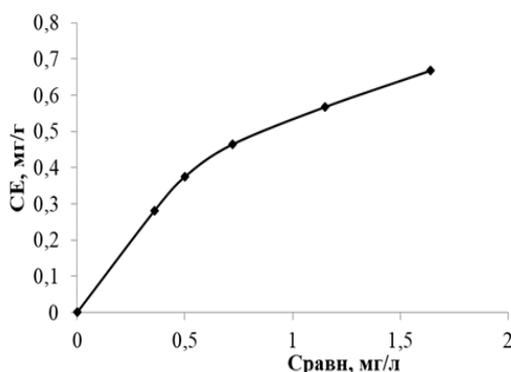


Рис. 5. Изотерма сорбции рибофлавина глауконитом

Fig. 5. Isotherm of riboflavin sorption by glauconite

составила 1.04 ± 0.15 $\text{дм}^3/\text{мг}$. Величина предельной адсорбции составила 1.03 ± 0.17 мг адсорбата на 1 г сорбента.

Обсуждая возможный механизм сорбции рибофлавина, следует рассмотреть строение поверхности глауконита. Главной составной частью глауконита является кремнезём. Кремнезёмы содержат на своей поверхности свободные силанольные группы, которые частично ионизованы, в результате чего поверхность сорбента, насыщенная водой, несёт некоторый отрицательный заряд. На поверхности кремнезёмов находятся также силосановые группы, обладающие протоноакцепторными свойствами, геминальные и вициальные силанольные группы, действующие как доноры протонов [17]. Согласно [18] можно предположить, что в процессе сорбции рибофлавина принимают участие активные центры поверхности глауконита как кислотного, так и основного характера.

Хорошие сорбционные свойства поверхности глауконита обеспечивают поверхностные гидроксильные: Si-OH, Al-OH, Fe-OH, Mg-OH, мостиковые Si-O(H⁺)-Al и другие группы кислотного или основного характера, поляризованные молекулы воды (центры Брэнстеда), координационно-ненасыщенные катионы Al³⁺, Fe²⁺/Fe³⁺, поверхностные анионы

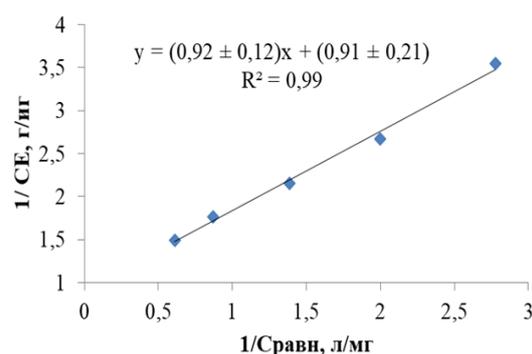


Рис. 6. Изотерма сорбции в линейном виде

Fig. 6. Isotherm of sorption in linear form

кислорода (центры Льюиса), а также дефекты структуры (ребра, грани, сколы). Обменные катионы формируют слой связанной воды на границе глауконит-раствор, вступая в химическую связь с молекулами твёрдой поверхности и переходя в состав кристаллической решётки [19].

Заключение

Спектрофотометрическим методом исследована сорбционная способность глауконита по отношению к рибофлавину, рассчитаны основные сорбционные характеристики (SE, R). Построена изотерма сорбции, которая аппроксимируется уравнением Ленгмюра. Рассчитаны константа уравнения Ленгмюра ($K_L = 1.04$ $\text{дм}^3/\text{мг}$) и предельная сорбционная ёмкость ($SE = 1.03$ мг/г). Полученные результаты свидетельствуют о мономолекулярном характере адсорбции витамина на поверхности глауконитового сорбента. Полученные композиты могут быть использованы в качестве кормовой добавки в животноводстве.

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.

Список литературы/References

1. Breshchenko E.E., Melkonyan K.I. Biologicheski aktivnye veshchestva. Vitaminy, fermenty, gormony: uchebno-metodicheskoe posobie. Krasnodar, Lan', 2023, 136 p. (In Russ.)
2. Aragao M.A., Pires L., Santos-Buelga C., Barros L., Calhella R.C. *Foods*. 2024; 14(13): 2255. <https://doi.org/10.3390/foods13142255>
3. Szczuko M., Ziętek M., Kulpa D., Seidler T. *Pteridines*. 2019; 30: 33-47. <https://doi.org/10.1515/pteridines-2019-0004>
4. Shachneva E.Yu., Mendalieva M.R., Zulkhayaeva A.S., Akbirdieva Yu.A. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2014; 34(3): 121-126.
5. Lanin S.N., Rychkova S.A., Vinogradov A.E., Viryasov M.B., Vostrov I.A., Shatalov I.A. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protssesy*. 2015; 15(2): 179-195.
6. Zhuchkov A.N., Gokzhaev M. B., Skopintsev V. D., Berlyand A.S., Antonov M.I., Levina I.YU. *Zhurnal nauchnykh statei "Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke"*. 2008; 10(3): 440-441.
7. Ma X., Chen Zh., Sun Y., Cai Zh., Cheng F., Ma W. *Separation and Purification Technology*. 2022; 292(3): 120995. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120995>
8. Mateos R., Vera S., Pascual A., Andrés M. *Applied Clay Science*. 2018; 163: 279-290. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.07.033>
9. Venig S. B., Chernova R.K., Serzhantov V.G., Rusanova T.YU., Mikerov A.N., Shapoval O.G., Glushakov I.A., Selifonova E.I., Naumova G.N. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ehkologiya*. 2021; 21(1): 62-71. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-62-71>
10. Cai Z., Finnie J., Manavis J., Blumbergs P. *Hum Exp Toxicol*. 2023; 42: 9603271231188970. <https://doi.org/10.1177/09603271231188970>
11. Torreggiani C., Maes D., Franchi L., Raffi V., Borri E., Prospero A., Chiapponi C., Luppi A. *Porcine Health Manag*. 2023; 9(1): 12. <https://doi.org/10.1186/s40813-023-00308-y>
12. Shastak Y., Pelletier W. *Animals*. 2023; 13(22): 3554. <https://doi.org/10.3390/ani13223554>
13. Chernyshkov A.S. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019; 32(1): 32-37.
14. Ovchinnikov A.A., Ovchinnikova L.YU., Eremkina O.S. *Vestnik Kurganskoi GSKHA*. 2019; 29(1): 39-42.
15. Makhova T.M., Doronin S.YU. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ehkologiya*. 2021; 21(2): 152-158. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>
16. Naumova G.N., Selifonova E.I., Chernova R.K., Venig S.B., Serzhantov V.G., Zakharevich A.M. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protssesy*. 2017; 17(1): 141-147.
17. Koganovskii A.M., Levchenko T.M., Kirichenko V.A., Roda I.G. *Adsorbtsiya organicheskikh veshchestv iz vody*. Leningrad, Khimiya, 1990, 256 p. (In Russ.)
18. Kim S.M., Jeong G.H., Lee K.Y., Kwon K., Han S.W. *Journal of Materials Chemistry*. 2008; 18(19): 2208-2212.
19. Bel'chinskaya L.I., Khodosova N.A., Novikova L.A., Strel'nikova O.Yu., Ressenner F., Petukhova G.A., Zhabin A.V. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2016; 52(4): 363-37. <https://doi.org/10.7868/S0044185616040057> (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

А.М. Новицкая – магистрант кафедры аналитической химии и химической экологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Е.В. Юрова – аспирант кафедры аналитической химии и химической экологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Е.И. Селифонова – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории наноаналитики ОНИ НС и

A.M. Novitskaya – the postgraduate student of the department of analytical chemistry and chemical ecology, Saratov national research state university of N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

E.V. Yurova – the postgraduate student of the department of analytical chemistry and chemical ecology, Saratov national research state university of N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

E.I. Selifonova – Ph.D in chemistry, senior researcher at the laboratory of nanoanalytics ERI



БС, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

В.Г. Сержантов – к.ф.-м.н., заведующий кафедрой сорбционных материалов на базе ООО «Эко-Сорбент», СГУ имени Н.Г. Чернышевский, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

С.Б. Вениг – д.ф.-м. наук, профессор, директор института физики СГУ имени Н.Г. Чернышевского, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Т.Ю. Русанова – зав. кафедрой аналитической химии и химической экологии, д.х.н., Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

nanostructures and biosystems, Saratov national research state university of N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

V.G. Serzhantov – PhD in physics and mathematics, head of the department of sorption materials at LLC "EcoSorbent", Saratov national research state university of N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

S.B. Venig – grand PhD in physics and mathematics, prof., head of the department of materials science, technology and quality management FNBMT, Saratov national research state university of N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

T.Yu. Rusanova – grand Ph.D in chemistry, head of the department of analytical chemistry and chemical ecology of the Institute of chemistry, Saratov national research state university of N. G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 01.10.2025; accepted for publication 15.10.2025.