

А. К. Смирнов, Н. А. Власова, А. С. Зиганшина

## СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОБАЛЬТА (II) ДИОКТАЭДРИЧЕСКИМ СМЕКТИТОМ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

*Ключевые слова:* сорбция, кобальт(II), смектит диоктаэдрический, степень извлечения, изотерма сорбции, предельная сорбция, эффективная энергия сорбции, модель Ленгмюра, уравнение Дубинина-Радушкевича.

Целью работы являлось установление ключевых физико-химических параметров, характеризующих сорбционное поведение природного диоктаэдрического смектита по отношению к ионам кобальта (II) в водных растворах сульфата кобальта, а также идентификация доминирующего механизма сорбции. Оценено влияние кислотности раствора на сорбционные свойства. Показано, что смектит диоктаэдрический характеризуется широким плато сорбции в диапазоне  $pH > 4$ . Проведенный анализ показал, что экспериментально полученные изотермы сорбции удовлетворительно аппроксимируются как классической моделью Ленгмюра, предполагающей мономолекулярную адсорбцию на однородных активных центрах, так и моделью Дубинина-Радушкевича, описывающей процесс с позиции теории объемного заполнения пор (ТОЗМ). Рассчитаны удельная площадь поверхности сорбента (по результатам сорбции  $Co(II)$ ), константа сорбционно-десорбционного равновесия (константа изотермы Ленгмюра). Согласованность результатов, полученных при применении двух независимых моделей, подтверждает адекватность и непротиворечивость экспериментальных данных. Рассчитанные значения эффективной энергии сорбции для исследованной системы свидетельствуют о том, что сорбция ионов  $Co(II)$  на поверхности диоктаэдрического смектита протекает преимущественно по механизму физической сорбции. Данный механизм характеризуется преобладанием обратимых и относительно слабых по своей энергетике взаимодействий между сорбентом и сорбатом, таких как электростатические и вандерваальсовы силы. Установленный физико-химический механизм закономерно объясняется спецификой строения функциональных групп, обладающих высокой хелатирующей способностью по отношению к ионам переходных металлов (например, карбоксильных или фенольных), а также ограниченное число ионогенных групп, способных к ионному обмену.

A. K. Smirnov, N. A. Vlasova, A. S. Ziganshina

## SORPTION EXTRACTION OF COBALT (II) BY DIOCTAHEDRAL SMECTITE FROM AQUEOUS SOLUTIONS

*Keywords:* sorption, cobalt(II), dioctahedral smectite, degree of extraction, sorption isotherm, limiting sorption, effective sorption energy, Langmuir model, Dubinin-Radushkevich equation.

The aim of the work was to establish the key physicochemical parameters characterizing the sorption behavior of natural dioctahedral smectite with respect to cobalt(II) ions in aqueous solutions of cobalt sulfate, as well as to identify the dominant sorption mechanism. The effect of solution acidity on the sorption properties was estimated. It was shown that dioctahedral smectite is characterized by a wide sorption plateau in the  $pH$  range  $> 4$ . The analysis showed that the experimentally obtained sorption isotherms are satisfactorily approximated by both the classical Langmuir model, which assumes monomolecular adsorption on homogeneous active sites, and the Dubinin-Radushkevich model, which describes the process from the standpoint of the volume pore filling theory (VPF). The specific surface area of the sorbent (based on the results of  $Co(II)$  sorption) and the sorption-desorption equilibrium constant (Langmuir isotherm constant) were calculated. The agreement between the results obtained using two independent models confirms the adequacy and consistency of the experimental data. The calculated effective sorption energies for the studied system indicate that the sorption of  $Co(II)$  ions on the surface of dioctahedral smectite occurs predominantly via the physical sorption mechanism. This mechanism is characterized by the predominance of reversible and relatively weak interactions between the sorbent and sorbate, such as electrostatic and van der Waals forces. The established physicochemical mechanism is naturally explained by the specific structure of the natural aluminosilicate used, characterized by a low content of functional groups with high chelating capacity for transition metal ions (e.g., carboxyl or phenolic), as well as a limited number of ionogenic groups capable of ion exchange.

### Введение

Загрязнение окружающей среды ксенобиотиками остается одной из самых актуальных глобальных проблем, решение которой до сих пор не найдено, и ее серьезность в XXI веке продолжает возрастать. В числе современных ксенобиотиков особое внимание привлекают соли тяжелых цветных металлов, таких как свинец, кадмий, кобальт, хром и ртуть. Эти вещества проникают в организм человека не только через пищеварительный тракт, который наиболее уязвим к воздействию техногенных экотоксикантов, но и через органы дыхания, кожные покровы и

слизистые оболочки. Кобальт, как известно, относится к незаменимым микроэлементам, играющим важную роль в жизнедеятельности как животных, так и человека. Его ключевая функция заключается в участии в синтезе витамина  $B_{12}$ . Кобальт является активатором различных ферментов, влияющих на синтез нуклеиновых кислот. Важно отметить, что несмотря на свою жизненную необходимость в малых количествах, кобальт в больших концентрациях токсичен [1]. Повышенное содержание кобальта может наблюдаться при избыточном приеме витамина  $B_{12}$ , у лиц, работающих

в металлургической, стекольной и цементной промышленности. Пыль, содержащая соединения кобальта, при поступлении в легкие способна вызывать отек и легочные кровотечения. Летальная доза кобальта для животных составляет 25–30 мг/кг; для человека 150–500 мг/кг. Наиболее высокой токсичностью для человека обладают растворимые соли: кобальта хлорид, кобальта карбонат, а также металлический кобальт [2]. Современные исследования показывают, что высокая биологическая доступность солей кобальта и их присутствие в пищевых цепочках человека связаны с деятельностью человека, включая работу угольных электростанций, производство определенных пищевых продуктов и обработку металлов. Питание играет ключевую роль в поступлении кобальта в организм, и его избыток может вызывать серьезные токсические эффекты, включая мутагенез и канцерогенез [3]. С учетом вышесказанного, разработка эффективных методов оценки уровня поступления кобальта и изучение его кинетики в организме человека становятся крайне важными.

Одним из способов нейтрализации и выведения тяжелых металлов является сорбция, для чего используются различные энтеросорбенты [4]. Настоящее исследование посвящено анализу сорбционных свойств диоктаэдрического смектита – широко представленного на фармацевтическом рынке энтеросорбента [5]. Данный сорбент представляет собой природную смесь монтмориллонита и сапонита, содержащую оксиды кремния, магния, алюминия, натрия, калия и воду [6]. Экспериментальные данные подтверждают наличие у смектита выраженного обволакивающего действия, ограниченной набухаемости и приемлемых сорбционных качеств [7]. Однако количественные показатели его сорбционной активности в литературе освещены недостаточно полно.

### Экспериментальная часть

Исследование сорбционных свойств по отношению к ионам кобальта ( $\text{Co}^{2+}$ ) проводили в статических условиях. В рамках эксперимента были подготовлены водные растворы сульфата кобальта (II) ( $\text{CoSO}_4$ ) с различными начальными концентрациями, варьирующимися от  $10^{-6}$  до  $10^{-1}$  моль/л. Эксперимент проводили в строго контролируемых температурных условиях ( $20,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ ), поддерживаемых термостатом модели ТЖ-ТС-01. Для количественного определения концентрации ионов кобальта до начала и после завершения процесса сорбции применялся фотометрический метод с использованием КФК-3-01. Суть методики [8] заключается в измерении оптической плотности красного комплекса, который образуется при реакции ионов кобальта с реагентом нитрозо-R-соль. Измерения проводились при длине волны 540 нм. Все химические реагенты, использованные в работе, соответствовали стандарту чистоты не ниже ч.д.а.

### Обсуждение результатов

Сорбция из растворов, как известно, зависит от множества взаимосвязанных факторов. Ключевыми

среди них являются температура, кислотность среды, а также природа как самого сорбента (его надмолекулярная структура, наличие функциональных групп), так и сорбата (его химическое строение, размер иона или молекулы, степень гидратации). Влияние этих параметров часто не является аддитивным. Так, при построении изотермы сорбции, графически отображающей зависимость количества сорбированного вещества от его равновесной концентрации в растворе, часто используют метод разбавления исходного раствора для получения ряда образцов с различной концентрацией. Однако, такой подход при работе с ионами металлов, склонными к гидролизу, как, например, ион кобальта ( $\text{Co}^{2+}$ ), приводит к изменению pH раствора. Высокие значения pH способствуют образованию гидроксидов кобальта, которые могут осаждаться, искусственно завышая, или наоборот, уменьшая, кажущуюся сорбционную емкость. Низкие значения pH, с другой стороны, могут препятствовать сорбции из-за конкурентного взаимодействия ионов водорода с активными центрами сорбента. Поэтому, при исследовании сорбции ионов кобальта, контроль и учет изменения pH раствора является критически важным. Для этого необходимо проводить точные измерения pH каждого разбавленного раствора перед проведением и после сорбционного эксперимента. Полученные таким образом данные сорбции позволяют построить более корректную изотерму и определить истинную сорбционную способность в заданных условиях. Кроме того, анализ влияния pH на сорбцию позволяет определить оптимальный диапазон pH для максимальной эффективности процесса, что имеет практическое значение для оценки эффективности работы сорбента, как в организме человека или животного, а также при оптимизации технологии очистки сточных вод.

Для изучения влияния кислотности среды на сорбцию ионов кобальта ( $\text{Co}^{2+}$ ) с использованием смектита диоктаэдрического в качестве сорбента был проведен эксперимент регулировкой pH раствора  $\text{CoSO}_4$  с концентрацией  $C = 1 \cdot 10^{-5}$  М. Измерение pH проводилось с использованием pH-метра АНИОН-4100. Уровень кислотности раствора варьировали, применяя растворы соляной кислоты и гидроксида натрия различной концентраций. После подкисления (или подщелачивания) растворов сульфата кобальта (II) устанавливалась концентрация этих ионов по измеренной оптической плотности до и после процесса сорбции. Для расчета величины степени извлечения ( $\alpha$ ) применяли следующее выражение:

$$\alpha = \frac{C_0 - C_s}{C_0} \times 100\%,$$

где  $C_0$  – исходная концентрация  $\text{CoSO}_4$  в растворе (моль/л),  $C_s$  – равновесная концентрации сорбата, моль/л;

Исследование выявило сложную зависимость, демонстрирующую нелинейный характер процесса. Экспериментальные данные, представленные на рисунке 1, наглядно иллюстрируют эту взаимосвязь, которая свидетельствует о том, что способность смектита диоктаэдрического поглощать ионы  $\text{Co}^{2+}$  существенно зависит от значения pH раствора.

В частности, в слабокислой среде (pH <4), сорбция ионов кобальта значительно снижается. Это объясняется конкурентным взаимодействием ионов

водорода ( $H^+$ ) и ионов кобальта за активные центры на поверхности минерала. Ионы  $H^+$ , в условиях повышенной кислотности, более эффективно конкурируют за эти центры, являющиеся, предположительно, анионными группами на поверхности слоёв смектита, такими как силанольные группы (Si-OH) или алюминатные группы (Al-OH). Эти группы диссоциируют с образованием отрицательно заряженных центров, которые притягивают катионы. При  $pH > 9$  выпадает осадок. Происходит образование гидроксидов кобальта, которые осаждаются на поверхности сорбента, искажая результаты. Плато сорбции для кобальта (II) в интервале 4,0–9,0 ед. pH свидетельствует о широком диапазоне кислотности, при котором сорбент — “Смекта” может эффективно использоваться.

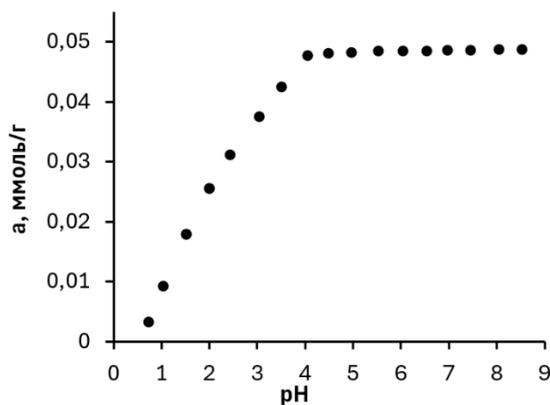


Рис. 1 – Зависимость величины сорбции ионов Co(II) от pH раствора ( $C_0(Co^{2+}) = 1 \cdot 10^{-5}$  моль/л)

Fig. 1 – Dependence of the sorption of Co(II) ions on the pH of the solution ( $C_0(Co^{2+}) = 1 \cdot 10^{-5}$  mol/l)

В настоящей работе была также проведена оценка влияния величины модуля раствор/сорбент на значения сорбции, что может быть использовано для выбора оптимального расхода сорбента, а также для расчёта константы распределения [9-12]. Для этого нами были рассчитаны значения сорбции ионов Co(II) из растворов с концентрацией  $1,5 \cdot 10^{-4}$  моль/л в диапазоне модуля раствор/сорбент от 25 до 1000 мл/г. Для этого навески сорбента в диапазоне от 0,1 до 1 г заливали различными объемами раствора сульфата кобальта в интервале от 25 до 100 мл. Процесс сорбции проводили в течении нескольких часов (время достижения равновесия в системе было оценено предварительно).

Результаты экспериментов по изучению влияния величины модуля раствор/сорбент ( $V/m$ ) на степень извлечения ионов кобальта представлены на рисунке 2. Было выявлено, что при росте значения модуля эффективность извлечения кобальта (II) смектитом диоктаэдрическим снижается.

Для определения сорбционных свойств энтеросорбента «смектит диоктаэдрический» использовали метод построения изотерм сорбции. Экспериментальная изотерма представлена на рис. 3.

Для объяснения изотерм сорбции ионов металлов из растворов различными сорбентами применяются различные теоретические модели. В случае нашего

сорбента неорганического происхождения, несмотря на его гетерогенную поверхность и отсутствие энергетической эквивалентности адсорбционных центров, экспериментальные данные хорошо согласуются с моделью Ленгмюра (табл. 1).

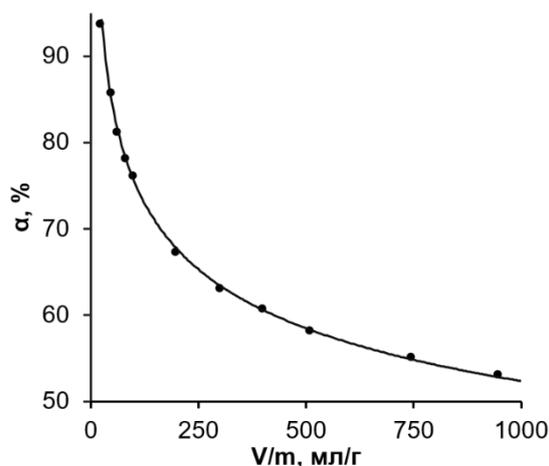


Рис. 2 – График зависимости величины степени извлечения ионов кобальта от величины модуля

Fig. 2 – Graph of the dependence of the degree of extraction of cobalt ions on the magnitude of the modulus

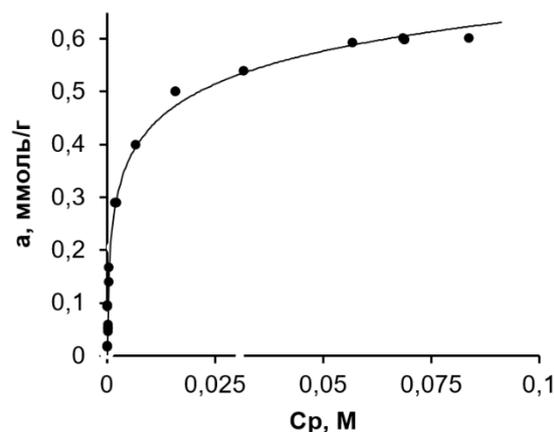


Рис. 3 – Изотерма сорбции ионов Co(II)

Fig. 3 – Isotherm of Co(II) ion sorption

Уравнение линеаризованной формы выглядит следующим образом:

$$\frac{C_s}{a} = \frac{C_s}{a_\infty} + \frac{1}{a_\infty K}$$

где  $a$  – значение равновесной сорбции, отвечающее равновесной концентрации сорбата, моль/г;  $a_\infty$  – величина предельной (максимальной) равновесной сорбционной емкости, моль/г;  $C_s$  – равновесная концентрация ионов Co(II) в растворе, моль/л;  $K$  – константа сорбционно-десорбционного равновесия, отражающая аффинность сорбента к сорбату.

Модель Ленгмюра успешно используется для оценки удельной поверхности адсорбента. С учетом высокой способности материала связывать полярные молекулы воды, сорбционную емкость рассчитывали, исходя из площади, занимаемой на поверхности одним ионом металла, равной площади его гидратированной формы.

$$S_0 = \pi \cdot (r_{Co^{2+}} + 2 \cdot r_{H_2O})^2,$$

где  $r_{Co^{2+}} = 0,072$  нм – кристаллохимический радиус иона кобальта (II),  $r_{H_2O} = 0,145$  нм – эффективный радиус молекулы воды. Удельную поверхность ( $S_{уд}$ ) вычисляли по формуле:

$$S_{уд} = a_0 S_0 N_a,$$

где  $S_{уд}$  – удельная поверхность сорбента, м<sup>2</sup>/г;  $S_0$  – расчетная площадь, экранируемая на поверхности одним гидратированным ионом металла, м<sup>2</sup>;  $N_a$  – постоянная Авогадро, моль<sup>-1</sup>.

В литературе для теоретического описания процесса сорбции из жидкой фазы — в частности, когда поверхность сорбента характеризуется энергетической неоднородностью — часто используют уравнение Дубинина – Радускевича [12-14]:

$$\ln a = \ln a_0 - \left(\frac{RT}{E_{eff}}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{c_0}{c_s}\right)^2,$$

где  $T$  – температура, К;  $E_{eff}$  – характеристическая свободная энергия сорбции, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К).

**Таблица 1 – Параметры обработки изотерм сорбции ионов  $Co^{2+}$  смектитом уравнениями Ленгмюра и Дубинина-Радускевича**

**Table 1 – Parameters of the treatment of  $Co^{2+}$  ion sorption isotherms with smectite using the Langmuir and Dubinin-Radradkevich equations**

Модель Ленгмюра		
$a_{\infty}$ , ммоль/г	$K$ , л/ммоль	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
0,6	258	156
Уравнение Дубинина-Радускевича		
$a_{\infty}$ , ммоль/г	$E_{eff}$ , кДж/моль	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
0,54	4,48	36

Модель сорбции, разработанная Дубининым и Радускевичем, описывает равновесие при адсорбции на микропористых твердых материалах. С теоретической точки зрения, это уравнение является частным случаем более общей теории объемного заполнения микропор (ТОЗМ), при этом параметр распределения  $n$  равен 2. Такое значение характерно для пористых структур с преобладанием сверхмикропор и однородной энергией адсорбции. Основное преимущество использования уравнения Дубинина-Радускевича для обработки экспериментальных данных заключается в возможности количественного определения параметра  $E_{eff}$  - характеристической свободной энергии сорбции. Этот параметр имеет фундаментальное значение для идентификации преобладающего механизма сорбционного процесса (природы сил, ответственных за сорбционное взаимодействие). Так, значение энергии  $E_{eff}$  позволяет разграничить основные механизмы адсорбции: при величине  $E_{eff} < 8$  кДж/моль процесс протекает преимущественно как физическая адсорбция, обусловленная слабыми вандерваальсовыми взаимодействиями; при

значениях  $E_{eff}$  в интервале от 8 до 16 кДж/моль наблюдаются процессы, характерные для хемосорбции, связанной с образованием более прочных химических связей между адсорбатом и поверхностью [13-15].

Сравнительный анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что значения предельной сорбционной емкости смектита по отношению к ионам кобальта ( $Co^{2+}$ ), полученные при использовании линеаризующих координат уравнений Ленгмюра ( $C_s/a$  от  $C_s$ ) и Дубинина-Радускевича ( $\ln a$  от  $(\ln(C_0/C_s))^2$ ) хорошо согласуются друг с другом. Рассчитанное значение  $E_{eff}$  находится в диапазоне, характерном для физической адсорбции. Это позволяет сделать вывод, что физическая адсорбция, вызванная вандерваальсовыми и электростатическими силами, играет преобладающую роль в процессе сорбции катионов кобальта (II) на поверхности смектита. В отличие от этого, хемосорбция, связанная с образованием химических связей, менее значима.

### Литература

1. Скальный, А.В. Биоэлементы в медицине /А.В. Скальный, И.А. Рудаков/ - М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век», Мир 2004. – 272 с.
2. Современные аспекты регуляторных, патофизиологических и токсических эффектов, вызываемых ионами кобальта при оральном поступлении в организм человека /С.И. Долomatov, Т.П. Сатаева, В. Жуков // Медицинская академия им. С.И. Георгиевского Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского.
3. Гудиева, И.Р. Физиологические свойства кобальта и его влияние на организм человека / И.Р. Гудиева. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2019. — № 5 (243). — С. 42-46.
4. Панфилова, В.Н. Применение энтеросорбентов в клинической практике /В.Н. Панфилова, Т.Е. Таранушенко // Педиатрическая фармакология. – 2012. - №9 (6). – С. 34–39
5. Х. Шаевска, П. Дзехаж, И. Мрукович Вопросы современной педиатрии, 6, 32-41 (2007)
6. В.Д. Буханов, А.И. Везенцев, Н.Ф. Пономарева, Л.А. Козубова, С.В. Королькова, Н.А. Воловичева, В.А. Перистый Региональные системы, 17, 57-63 (2011)
7. Н.И. Урсова, Вопросы современной педиатрии, 11, 26-31 (2012)
8. ПНД Ф 14.1:2.44-96 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов кобальта в природных и сточных водах фотометрическим методом с нитрозо- $R$ -солью. – М.: ФБУ «ФЦАО», 2013. – 13 с.
9. Т.И. Никифорова. Дисс. докт. хим. наук, ФГБОУ ВПО “Ивановский государственный химико-технологический университет”, Иваново, 2014. 365 с.
10. Нве Шван У. Дисс. канд. хим. наук, ФГБОУ ВПО “Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева”, Москва, 2014. 124 с.
11. Р.З. Зейналов. Дис. канд. хим. наук, ФГБОУ ВПО “Дагестанский государственный университет”, Махачкала, 2015. 138 с.
12. И.А. Ежова Современные проблемы естественных наук и фармации, 14, 132-134 (2025)
13. А.Е. Микутова Современные проблемы естественных наук и фармации, 13, 176-177 (2024)
14. М.Н. Каратаева Современные проблемы естественных наук и фармации, 13, 156-159 (2024)

15. Е.И. Айтова Медицина и фармация. прошлое, настоящее, будущее, IV, 23-25 (2023)

### References

1. Skalny, A.V. Bioelements in medicine/ A.V. Skalny, I.A. Rudakov/ - M.: Publishing house "ONYX 21st century", Mir 2004. – 272 p.
2. Modern aspects of regulatory, pathophysiological and toxic effects caused by cobalt ions upon oral ingestion into the human body / S.I. Dolomatov1, T.P. Sataeva 1, V. Zhukov // S.I. Georgievsky Medical Academy of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University.
3. Gudieva, I. R. The physiological properties of cobalt and its effect on the human body / I. R. Gudieva. — Text: direct // Young scientist. — 2019. — № 5 (243). — Pp. 42-46.
4. Panfilova, V.N. The use of enterosorbents in clinical practice/ V.N. Panfilova, T.E. Taranushenko // Pediatric pharmacology. – 2012. - №9 (6). – Pp. 34-39
5. H. Shaevska, P. Dzekhtsazh, I. Mrukovich, Issues of modern Pediatrics, 6, 32-41 (2007)
6. V.D. Bukhanov, A.I. Vezentsev, N.F. Ponomareva, L.A. Kozubova, S.V. Korolkova, N.A. Volovicheva, V.A. Peristy, Regional Systems, 17, 57-63 (2011)
7. N.I. Ursova, Issues of Modern Pediatrics, 11, 26-31 (2012)
8. HDPE F 14.1:2.44-96 Quantitative chemical analysis of waters. Methodology for measuring the mass concentration of cobalt ions in natural and wastewater using the photometric method with nitroso-R-salt. Moscow: FBU "FCAO", 2013. 13 P.
9. T.I. Nikiforova. Diss. doc. chem. Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Ivanovo State Chemical-Technological University", Ivanovo, 2014. 365 p.
10. Nve Shwan U. Cand. of Chemical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia", Moscow, 2014. 124 p.
11. R.Z. Zeynalov. Diss. Cand. of Chemical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Dagestan State University", Makhachkala, 2015. 138 p.
12. I.A. Yezhova, Modern Problems of Natural Sciences and Pharmaceutics, 14, 132-134 (2025)
13. A.E. Mikutova, Modern Problems of Natural Sciences and Pharmacy, 13, 176–177 (2024)
14. M.N. Karataeva, Modern Problems of Natural Sciences and Pharmacy, 13, 156–159 (2024)
15. E.I. Aitova, Medicine and Pharmacy: Past, Present, Future, IV, 23–25 (2023)

© **А. К. Смирнов** – к.х.н., доцент кафедры Химии, Института естественных наук и фармации, кафедра Химии, Марийский Государственный Университет (МарГУ), Йошкар-Ола, Россия, aksmi@yandex.ru; **Н. А. Власова** – студент 5 курса института естественных наук и фармации, кафедра Химии, МарГУ, aksmi@yandex.ru; **А. С. Зиганшина** – к.х.н., доцент кафедры Технологии пластических масс, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, aygul.ziganshina.89@mail.ru

© **А. К. Smirnov** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the department of Chemistry at the Institute of Natural Sciences and Pharmacy, department of Chemistry, Mari State University (MarSU), Yoshkar-Ola, Russia, aksmi@yandex.ru; **N. A. Vlasova** – 5th year student of the Institute of Natural Sciences and Pharmacy, Department of Chemistry, MarSU, aksmi@yandex.ru; **A. S. Ziganshina** – PhD (Chemical Sci.), Assistance Professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, aygul.ziganshina.89@mail.ru

Дата поступления рукописи в редакцию – 19.01.26

Дата принятия рукописи в печать – 25.01.26