

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2027-19-1-1753](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2027-19-1-1753)EDN: [TXJRBT](https://www.edn.ru/TXJRBT)

УДК 54-414:599.735.31 – 035.563:546.48



Сравнительная характеристика сорбционной способности некоторых биополимеров и коммерческих энтеросорбентов по отношению к ионам Cd^{2+}

Н.А. Зубова, Л.В. Майер, Т.А. Корельская, Е.А. Журавлева,
Е.А. Айвазова, Н.А. Онохина

*Северный государственный медицинский университет,
Архангельск, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Ухудшение экологической обстановки приводит к росту концентрации тяжелых металлов (свинца, кадмия, ртути, меди, мышьяка) в биосфере, что создает серьезную угрозу здоровью человека. Особую опасность представляет кадмий: обладая выраженным кумулятивным эффектом, он провоцирует поражение печени, почек, ЦНС и нарушения минерального обмена, являясь при этом сильным канцерогеном.

Необходимость детоксикации организма, а также очистки промышленных сред, обуславливает поиск новых энтеросорбентов. Существующие аптечные препараты (на основе диоксида кремния, лигнина, смектитов) зачастую недостаточно эффективны против тяжелых металлов. Кроме того, их длительный прием чреват побочными эффектами: нарушениями работы ЖКТ и дефицитом жизненно важных нутриентов (витаминов, кальция, микроэлементов). Высокая стоимость таких средств также ограничивает их доступность.

В связи с этим актуальна разработка доступных и высокоэффективных сорбентов, в частности, на основе местного природного сырья. Перспективным направлением является создание препаратов из возобновляемых биоресурсов, таких как торф. Еще одним инновационным источником сырья для производства сорбентов ионов тяжелых металлов могут стать рога северных оленей – продукт оленеводства, развитого в Ненецком автономном округе.

Цель – сравнительная характеристика сорбционной способности костной ткани рогов северного оленя с некоторыми коммерческими препаратами энтеросорбентов в отношении ионов кадмия при pH 4 и 5.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования были выбраны образцы размельченной костной ткани рогов северного оленя (предоставлены ООО «Северный олень» (г. Нарьян-Мар)), гуминовые кислоты, выделенные из образцов верхового торфа Архангельской области, гидролизный лигнин (ТМ «Лакто-фильтрум», гидролизный лигнин + поливинилпирролидон + диоксид кремния (ТМ «Фильтрум-СТИ»), коллоидный диоксид кремния (ТМ «Полисорб МП») и активированный уголь (аптечный препарат). Для определения равновесной концентрации Cd^{2+} в модельных растворах после фильтрации использовали потенциометрический метод (прибор «Эксперт-001», ионселективный электрод «ЭЛИС-131(Cd)»). Эксперименты проводили при pH 4 и 5 для моделирования среды ЖКТ.

Результаты. Проведены исследования сорбционной способности препаратов костной ткани рогов северного оленя в отношении ионов Cd^{2+} . Дана сравнительная характеристика их сорбционной способности с препаратами гуминовых кислот и промышленных энтеросорбентов при значениях pH среды 4 и 5. Определены характеристики сорбционных процессов в соответствии с математическими моделями Лэнгмюра и Фрейндлиха. В работе показана возможность использования препаратов костной ткани и гуминовых кислот в комплексной терапии заболеваний, требующих проведение сорбции.

Ключевые слова: костная ткань рогов; тяжелые металлы; сорбционная способность; гуминовые кислоты; коммерческие энтеросорбенты

Для цитирования. Zubova N. A., Mayer L. V., Korelskaya T. A., Zhuravleva E. A., Ayvazova E. A., Onokhina N. A. (2027). Сравнительная характеристика сорбционной способности некоторых биополимеров и коммерческих энтеросорбентов по отношению к ионам Cd^{2+} . *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 19(1), 2001-2021. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2027-19-1-1753>

Comparative characteristic of the sorption capacity of some biopolymers and commercial enterosorbents in relation to Cd^{2+} ions

N.A. Zubova, L.V. Mayer, T.A. Korelskaya, E.A. Zhuravleva,
E.A. Ayvazova, N.A. Onokhina

Northern State Medical University, Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract

Background. The deterioration of the environmental situation leads to an increase in the concentration of heavy metals (lead, cadmium, mercury, copper, and arsenic) in the biosphere, which poses a serious threat to human health. Cadmium is particularly dangerous, as it has a pronounced cumulative effect and can cause liver, kidney, and

central nervous system damage, as well as mineral metabolism disorders, and is also a strong carcinogen.

The need for detoxification of the body and industrial environments has led to the search for new enterosorbents. Existing over-the-counter medications (based on silicon dioxide, lignin, and smectites) are often insufficiently effective against heavy metals. Additionally, prolonged use of these medications can lead to adverse side effects, such as gastrointestinal disorders and deficiencies in essential nutrients (vitamins, calcium, and trace elements). The high cost of these medications also limits their accessibility.

In this regard, the development of affordable and highly effective sorbents, in particular, based on local natural raw materials, is relevant. A promising area is the creation of preparations from renewable bioresources, such as peat. Another innovative source of raw materials for the production of heavy metal ion sorbents can be the antlers of reindeer, a product of reindeer herding, which is developed in the Nenets Autonomous Okrug.

Purpose. Compare the sorption capacity of the bone tissue of reindeer antlers with some commercial enterosorbent preparations in relation to cadmium ions at pH 4 and 5.

Materials and methods. The objects of the study were samples of crushed bone tissue of reindeer horns (provided by company “Northern Deer” (Naryan-Mar)), humic acids isolated from samples of peat from the Arkhangelsk region, hydrolysis lignin (“Lactofiltrum”, hydrolysis lignin + polyvinylpyrrolidone + silicon dioxide (“Filtrum”), colloidal silicon dioxide (Polysorb MP) and activated carbon (pharmaceutical preparation). The potentiometric method (Expert-001 device, ELIS-131(Cd) ion-selective electrode) was used to determine the equilibrium concentration of Cd^{2+} in model solutions after filtration. The experiments were conducted at pH 4 and 5 to simulate the gastrointestinal environment.

Results. The sorption capacity of reindeer antler bone tissue preparations for Cd^{2+} ions was studied. A comparative analysis of their sorption capacity with humic acid preparations and industrial enterosorbents at pH values of 4 and 5 was conducted. The characteristics of sorption processes were determined using Langmuir and Freundlich mathematical models. The study demonstrated the potential use of bone tissue preparations and humic acids in the treatment of diseases that require sorption.

Keywords: bone tissue of antlers; heavy metals; sorption capacity; humic acids; commercial enterosorbents

For citation. Zubova, N. A., Mayer, L. V., Korelskaya, T. A., Zhuravleva, E. A., Ayvazova, E. A., & Onokhina, N. A. (2027). Comparative characteristic of the sorption capacity of some biopolymers and commercial enterosorbents in relation to Cd^{2+} ions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 19(1), 2001-2021. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2027-19-1-1753>

Введение

Ионы тяжелых металлов (хром, железо, кобальт, кадмий, олово, сурьма, ртуть, свинец и др.) способны накапливаться на всех уровнях экологической пирамиды. Накопление их в организме приводит к канцерогенным и мутагенным эффектам, а также оказывает токсическое влияние на желудочно-кишечный тракт, сердечно-сосудистую, нервную и репродуктивную системы [13, с. 18]. Так, например, кадмий обладает мутагенным и канцерогенным действием, что приводит к возникновению почечной дисфункции, поражению мочевыводящей и половой системы и провоцируется развитие рака легких и почек. Из-за снижения всасывания железа в кишечнике и лизиса эритроцитов может развиваться анемия [12, с. 39-43]. Также происходит замещение ионов кальция на ионы кадмия из-за одинаковых радиусов этих ионов. Это приводит к нарушению всасывания кальция и выведению его из организма и как следствие, уменьшению прочности костной ткани [12, с. 39-43; 11, с. 66-71].

Кадмий поступает в организм в основном с пищей (90-95%), а также через воду и воздух. Накапливается в почках и печени, а также в легких, поджелудочной железе и других органах и тканях [12, с. 39-43]. В организме большая часть кадмия находится в токсичной ионной форме, а меньшая - в виде комплекса со специальным белком. Поступив в кровь, он связывается с эритроцитами и альбуминами плазмы и быстро переходит в различные ткани и органы. С годами кадмий, как и многие другие тяжелые металлы, имеет тенденцию к накоплению в организме. Поэтому больше всего его содержится в организме пожилых людей [14, с. 84-89].

Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности, теплоэнергетики, а также автомобильный и железнодорожный транспорт загрязняют атмосферный воздух тяжелыми металлами. Использование энтеросорбентов приводит к снижению нагрузки на печень и почки, что способствует нормализации пищеварительной функции ЖКТ, восстановлению целостности и проницаемости слизистой оболочки кишечника [15].

Микрокристаллическая целлюлоза, Полисорб, Лактофилтрум, Филтрум-СТИ – это природные органические сорбенты, которые способны адсорбировать и удерживать воду, нитраты, канцерогенные вещества и бактериальные токсины. При этом они не перевариваются и не усваиваются ферментами пищеварительной системы человека [14, с. 84–89].25

В организме энтеросорбенты, поглощая токсические вещества в просвете кишечника, поддерживают микробиоценоз кишечника, что ведет к улучшению и нормализации пищеварения [15; 9, с. 7-17]. В ряде работ

выявлена невысокая адсорбционная активность природных органических сорбентов по отношению к ионам тяжелых металлов. Поэтому поиск доступных и эффективных энтеросорбентов является перспективным и необходимым [9, с. 7-17; 7, с. 83-93].

В предыдущих исследованиях [1, с. 122-138; 2, с. 33-41] проанализирована сорбционная активность при pH 5 природных (ГК и ГNa) и коммерческих энтеросорбентов в отношении ионов Cd^{2+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} . Наибольшей адсорбционной активностью и прочностью связывания, возникающей между сорбентом и сорбтивом в отношении ионов Cd^{2+} и Cu^{2+} обладают гуминовые кислоты. Активированный уголь и Фильтрум-СТИ по сравнению с ГК отличаются максимальной скоростью связывания ионов Pb^{2+} и Cu^{2+} соответственно, а препараты ГК проявляют высокую селективность в отношении связывания ионов Cu^{2+} по сравнению с промышленными энтеросорбентами [1, с. 122-138].

Для ГК величины предельной адсорбции, прочности связывания ионов Cd^{2+} и сродства сорбента к сорбтиву имеют максимальные значения при pH 4 [1, с. 122-138]. Сорбционная емкость ГNa принимает максимальные значения при pH 3, однако для всех коммерческих энтеросорбентов при данном значении pH положительной корреляции не выявлено [5, с. 114-121; 6, с. 33-41].

В клинической практике при изучении механизмов лечебного действия энтеросорбентов, успешно используемых в комплексной терапии заболеваний, требующих проведения сорбции, основной их характеристикой является высокая адсорбционная активность [2, с. 74-88]. Так, например, лигнин гидролизный (Сорбикум) и фармацевтические сорбенты (активированный уголь, диоксид кремния) проявляют наибольшую эффективность в связывании ионов меди (II) и являются перспективными сорбентами для профилактики медных интоксикаций. Таким образом, вопрос разработки эффективных энтеросорбентов являются актуальными [10, с. 36-44].

Костный материал рогов северного оленя в этом плане представляет собой богатый и доступный сырьевой ресурс, который проявляет сорбционные свойства за счет физической и химической сорбции в отношении тяжелых металлов, таких как свинец и кадмий [8, с. 50-54].

Сорбционная активность используемых промышленных сорбентов в организме человека во многом зависит от значения pH различных отделов желудочно-кишечного тракта. Так pH ротовой полости пищевода составляет 5,5-7, кислотность различных отделов желудка: полости желудка – 1,5 - 2,0; 12-и перстной кишки – 5,6 - 7,9; тонкого кишечника – 7,2 - 7,5;

толстого кишечника – 8,5-8,6. Таким образом, применение как анализируемых коммерческих энтеросорбентов так и исследуемых в предыдущих работах препаратов гуминовых кислот [1, с. 130; 5, с. 118; 6, с. 38] будет наиболее эффективно именно в промежуточной и нижней частях желудка, с диапазоном pH 3-6.

Из всего вышеизложенного вытекает, что остается высокой актуальность поиска новых эффективных сорбентов, исследование и сравнительная характеристика сорбционной способности природных биополимеров в отношении тяжелых металлов по сравнению с соответствующими характеристиками уже известных на фармацевтическом рынке препаратов-энтеросорбентов.

Материалы и методы

Объекты исследования:

1. Образцы измельченных шнековым измельчающим механизмом рогов северного оленя предоставлены ООО «Северный олень» (г. Нарьян-Мар). Костная ткань сброшенных рогов северного оленя применяется, как правило, в качестве биологически активной добавки к пище ввиду наличия в составе различных микро- и макроэлементов (кальций и фосфор с высокой биодоступностью содержатся в виде гидроксиапатита в комплексе с оссеином – органическим компонентом костной ткани), витаминов, аминокислот, биологически активных пептидов, фосфолипидов. Пористое строение материала костной ткани дает предпосылки для использования его в качестве сорбента [3, с. 2]. Частицы имеют размеры в диапазоне от 10 до 130 мкм [2, с. 76]. В исследуемом образце преобладают частицы размером от 0,01 до 0,1 мм, составляющие 85–90% от общего числа. Данный размер частиц сопоставим с размерами высокодисперсного кремнезема (до 0,09 мм), который является основным действующим веществом препарата Полисорб [2, с. 78].

2. Препараты гуминовых кислот (ГК) и гуматов натрия (ГNa). Образцы ГК выделяли из образцов верхового торфа, отобранного на территории Архангельской области, с использованием общепринятой методики [6, с. 35].

3. Полисорб (ПС) – неорганический неселективный полифункциональный энтеросорбент на основе высокодисперсного кремнезема с размерами частиц до 0,09 мм и с химической формулой SiO_2 . Фармакотерапевтическая группа: энтеросорбирующее действие, противодиарейные препараты, кишечные адсорбенты, выраженное сорбционное и детоксикационное действие [15, с. 52; 5].

4. Фильтрум-СТИ (ФС) – природный энтеросорбент, основным действующим веществом которого является лигнин гидролизный. Вспомогательные вещества: поливинилпирролидон, целлюлоза, диоксид кремния, тальк, стеарат кальция. Фармакотерапевтическая группа: энтеросорбирующее средство, детоксицирующее средство.

5. Лактофильтрум (ЛФ) - природный энтеросорбент, основным действующим веществом которого является лигнин гидролизный. Вспомогательные вещества: лактулоза, магния стеарат. Фармакотерапевтическая группа: энтеросорбирующее средство [14, с. 53; 15].

6. Активированный уголь (АУ) - детоксицирующее средство, антидот, адсорбент.

В редких случаях при использовании данных коммерческих препаратов наблюдаются следующие побочные эффекты: аллергические реакции, диспепсия, запоры. При длительном приеме возможно нарушение всасывания витаминов и кальция, в связи с чем рекомендуется профилактический прием поливитаминных препаратов и препаратов, содержащих кальций [11, с. 67; 15].

В ходе проведения эксперимента были исследованы растворы с концентрацией ионов кадмия от 2 до 400 мкг/мл для оценки адсорбционной способности указанных объектов. Растворы готовили разбавлением основного стандартного раствора с концентрацией ионов Cd^{2+} 1 г/л. После доведения каждого раствора до значения pH 4 или 5, проводилось измерение ЭДС растворов до адсорбции.

Навески препаратов массой $0,100 \pm 0,001$ помещали в конические колбы с исследуемыми растворами при pH 4 и 5. Колбы устанавливались в ротатор на 60 минут, после адсорбции в фильтрате вновь проводилось измерение ЭДС каждого раствора. Потенциометрическим методом с помощью иономера «Эксперт-001», содержащего стеклянный комбинированный и ионоселективный электроды, определяли уровень кислотности и равновесную концентрацию ионов кадмия в растворе [5, с. 37].

Степень извлечения ионов Cd^{2+} (мг/г сорбента) в растворах рассчитывали по формуле:

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

где $C_{\text{исх}}$ – концентрация Cd^{2+} до сорбции мкг/мл;

V – объем раствора, из которого проводили сорбцию, л

m – масса сорбента, г

Адсорбционную активность исследуемых препаратов (мг/г Cd^{2+} сорбента) рассчитывали по формуле:

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

где $C_{\text{исх}}$ – концентрация Cd^{2+} до сорбции мкг/мл;

$C_{\text{ост}}$ – концентрация Cd^{2+} после сорбции мкг/мл;

V – объем исследуемого раствора, л;

m – масса сорбента, г.

Для количественной оценки адсорбции использовали уравнения Лэнгмюра и Фрейндлиха. Уравнение сорбции Лэнгмюра описывает процессы сорбции веществ на одинарном гомогенном слое сорбента, с образованием мономолекулярного слоя адсорбата. Линейная форма уравнения Лэнгмюра имеет вид:

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_{\infty}} + \frac{1}{\Gamma_{\infty} \cdot \beta} \cdot \frac{1}{C}.$$

Уравнение Фрейндлиха используется для характеристики процессов сорбции веществ на гетерогенном слое сорбента только активных сорбционных центров, которые обладают максимальной энергией.

Константы Фрейндлиха рассчитываются по уравнению:

$$\lg \Gamma = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_p$$

K_F – коэффициент связывающий емкости (прочность связей между сорбентом и сорбтивом);

n – коэффициент интенсивности сорбции (скорость протекания процесса).

Результаты и обсуждение

В ходе исследования была проведена сравнительная оценка адсорбционной активности КТР при pH 4 и 5 в отношении ионов Cd^{2+} и проанализирована возможность использования данного препарата в лечебных целях.

На рис. 1 представлена графическая зависимость степени извлечения ионов кадмия КТР при различных значениях pH. Очевидно, что при увеличении концентрации исходных растворов от 2 до 400 мкг/мл степень извлечения Cd^{2+} уменьшается и достигает своего предельного значения при 200 мкг/мл для pH 5 и при 150 мкг/мл для pH 4.

Сорбционные свойства обычно оценивают на основе анализа изотерм сорбции (зависимость сорбционной способности от концентрации Cd^{2+} при постоянной температуре). Адсорбция (Γ) – это накопление вещества на границе фаз по сравнению с равновесной концентрацией данного вещества в растворе.

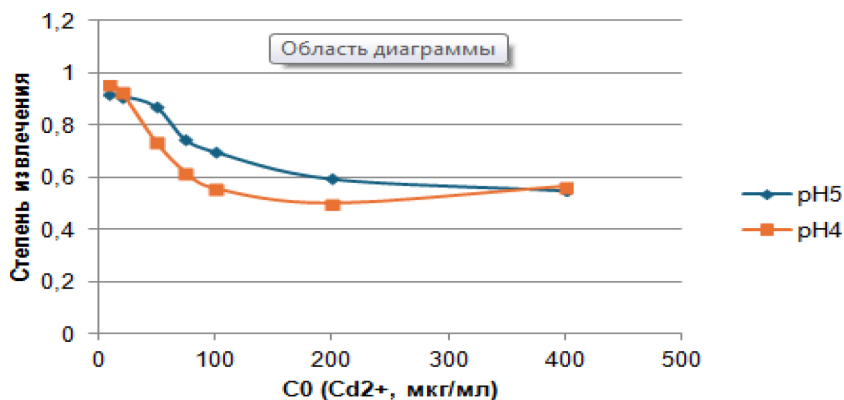


Рис. 1. Графическая зависимость степени извлечения ионов кадмия КТР при различных значениях pH

Fig. 1. Graph showing the relationship between the extraction efficiency of cadmium ions by KTR at various pH values

Сорбционные кривые КТР и ГК представлены на рис. 2.

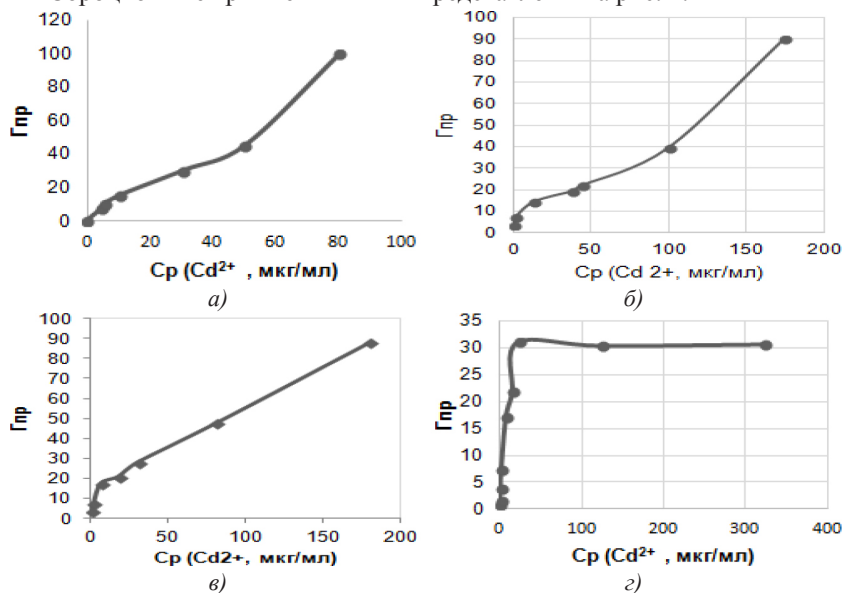


Рис. 2. Сорбционные кривые КТР при pH 4 (а), при pH 5 (б), сорбционные кривые ГК при pH 4 (в), при pH 5 (г)

Fig. 2. KTR sorption curves at pH 4 (a) and pH 5 (b); GK sorption curves at pH 4 (в) and pH 5 (г)

Вид сорбционных кривых ГК при pH 5 подтверждает процесс мономолекулярной адсорбции на поверхности сорбента. Согласно расчетам, сорбционная способность КТР в 2-3 раза больше аналогичной величины для ГК при всех значениях pH.

Для оценки связывающей активности производился расчет предельной сорбционной ёмкости (Γ_{∞}), определяющей количество сорбционных центров на поверхности активно взаимодействующего сорбента с сорбатом, и показателя сродства сорбента к сорбтиву (β).

Сравнительная характеристика параметров сорбционных процессов коммерческими сорбентами, препаратами ГК и КТР приведена в таблице 2.

Таблица 2.

Значения констант уравнения Ленгмюра для энтеросорбентов 2

Table 2. Values of the constants in the Langmuir equation for enterosorbents

Сорбент	$\Gamma_{\text{пр}}$	β	R^2
		pH 4	
КТР	22,57	0,44	0,93
ГК	35,80	30,42	0,97
АУ	4,02	4,73	0,94
ФС	12,47	0,87	0,80
ПС	1,6	2,09	0,99
ЛФ	5,56	0,30	0,36
		pH 5	
КТР	42,73	0,11	0,99
ГК	28,17	0,19	0,99
АУ	10,67	13,58	0,96
ФС	15,90	44,92	0,96
ПС	5,73	39,66	0,97
ЛФ	13,44	93,00	0,98

Коэффициенты аппроксимации R^2 , полученные для линейных моделей Ленгмюра, показывают высокую достоверность сорбционных процессов при pH 5 по сравнению с pH 4 для коммерческих и вновь предлагаемых сорбентов.

Нужно отметить достаточно высокую кадмийсвязывающую активность препаратов костной ткани рогов северного оленя и ГК по сравнению с энтеросорбентами. Значения сорбционной ёмкости (Γ_{∞}) при данных значениях pH составили для КТР - 42,73 мг/г при pH 5 и для ГК - 35,80 мг/г при pH, что превышает аналогичный параметр сорбционной активности других исследованных образцов в 3 - 9 раз.

По сравнению со всеми исследуемыми образцами максимальное значение степени сродства сорбентов к Cd^{2+} ($\beta=35,80$) выявлено для образцов гуминовых кислот при pH 4.

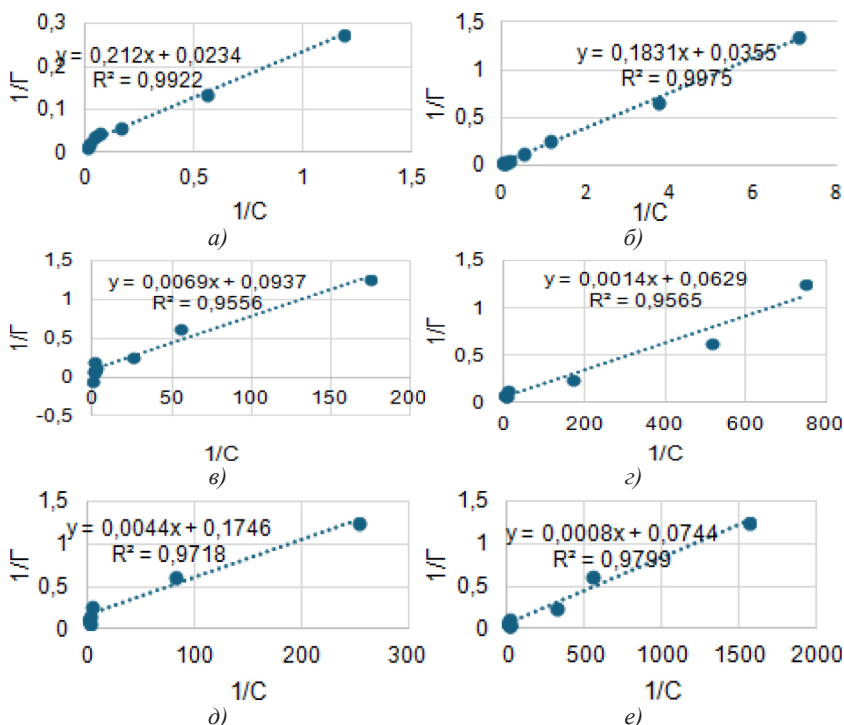


Рис. 3. Изотермы Лэнгмюра адсорбции Cd^{2+} сорбентами:

а) КТР; б) ГК в) АУ; г) ФС; д) ПС; е) ЛФ при pH 5

Fig. 3. Langmuir isotherms for the adsorption of Cd^{2+} by sorbents:

а) KTR; б) GC; в) AU; г) FS; д) PS; е) LF at pH 5

При сравнении величины сродства сорбентов к Cd^{2+} при pH 5 высокую селективность в отношении связывания данного иона проявляют промышленные препараты (ЛФ, ФС) в отличие от предлагаемых сорбентов. Таким образом, при накоплении Cd^{2+} в организм человека, коммерческие энтеросорбенты будут проявлять большую селективность в отношении связывания данного металла.

Графики изотерм Лэнгмюра адсорбции Cd^{2+} костной тканью рогов, гуминовых кислот и промышленных сорбентов при pH 5 приведены на рис. 3.

Линейная зависимость адсорбции ионов Cd^{2+} для КТР и ГК при pH 5 обеспечивается практически во всей области значения концентраций. При pH 4 линейная зависимость наблюдалась только в области низких концентраций от 0,45 мг/л до 37,12 мг/л.

Для промышленных энтеросорбентов линейная зависимость наблюдается только для АУ во всей области значения концентраций при pH 4 и 5 и для ЛФ при pH 5 соответственно.

Уравнение Фрейндлиха адсорбции ионов Cd^{2+} КТР, ГК и остальными исследованными сорбентами при pH 4 и 5 представлены на рис. 4, 5.

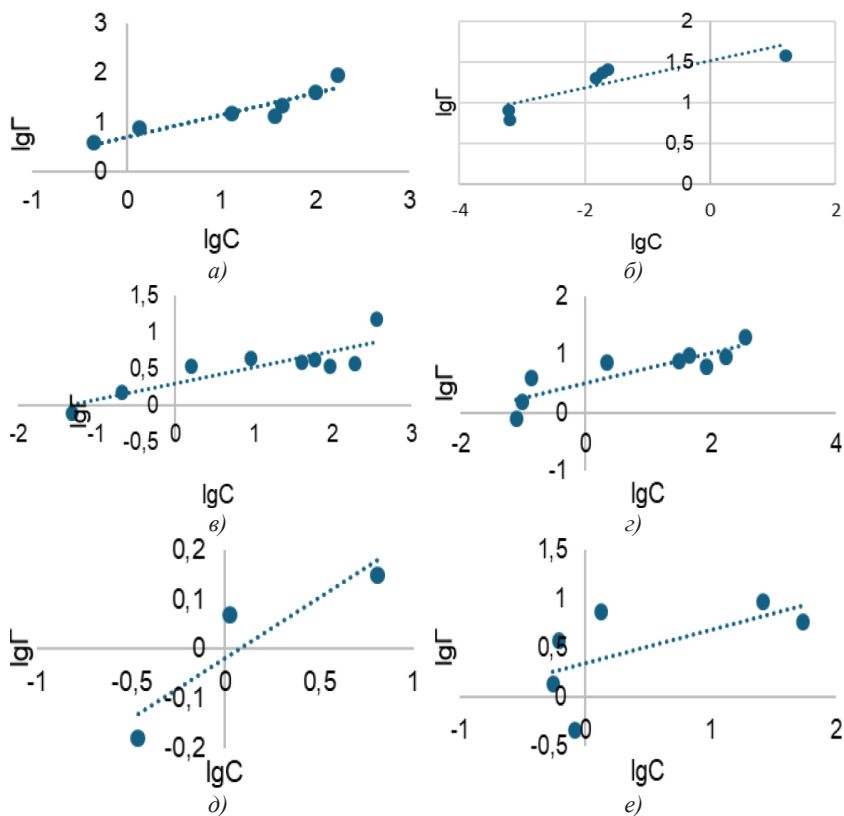


Рис. 4. Изотермы Фрейндлиха адсорбции Cd^{2+} исследуемыми сорбентами:
а) КТР; б) ГК в) АУ; г) ФС; д) ПС; е) ЛФ при pH 4

Fig. 4. Freundlich isotherms for the adsorption of Cd^{2+} by the sorbents under study:
а) KTR; б) GK; в) AU; г) FS; д) PS; е) LF at pH 4

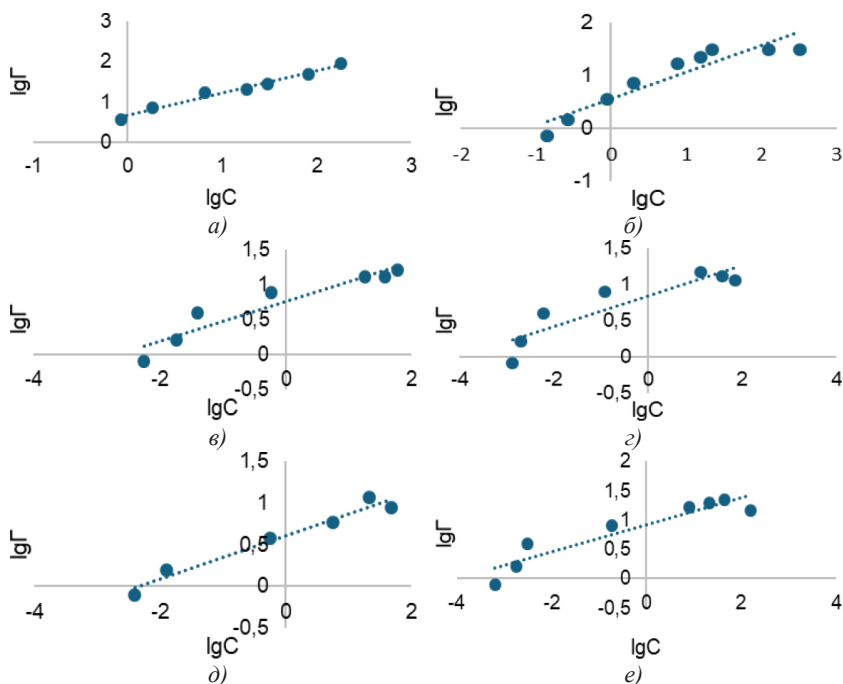


Рис. 5. Изотермы Фрейндлиха адсорбции Cd^{2+} исследуемыми сорбентами:

а) КТР; б) ГК в) АУ; г) ФС; д) ПС; е) ЛФ при pH 5

Fig. 5. Freundlich isotherms for the adsorption of Cd^{2+} by the sorbents under study:

а) KTR; б) GK; в) AU; г) FS; д) PS; е) LF at pH 5

При данных значений pH изотермы адсорбции, рассчитанные по уравнению Фрейндлиха, имеют линейный характер. Значения констант уравнений Фрейндлиха представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Значения констант изотермы Фрейндлиха для сорбентов

Table 3. Values of the Freundlich isotherm constants for sorbents

Сорбент	K_f	n	R ²
	pH 4		
КТР	5,13	2,28	0,87
ГК	32,58	5,98	0,76
АУ	1,98	4,59	0,72
ФС	3,26	3,92	0,76

ПС	0,96	4,12	0,85
ЛФ	2,22	2,94	0,36
	pH 5		
КТР	4,73	1,83	0,98
ГК	3,65	2,00	0,88
АУ	5,74	3,53	0,89
ФС	6,82	4,71	0,81
ПС	4,05	3,90	0,96
ЛФ	8,26	4,32	0,88

Сорбционные процессы также хорошо описываются уравнением Фрейндлиха при pH 5 практически для всех исследуемых сорбентов исходя из высоких значений коэффициентов аппроксимации R^2 , что говорит о протекании процесса связывания ионов Cd^{2+} в их гетерогенном слое.

Однако, ГК обладают наибольшей прочностью и скоростью связывания ионов Cd^{2+} при pH 4, так как коэффициент связывающей ёмкости K_F и коэффициент интенсивности сорбции n составляет 32,58 и 5,98 соответственно. Это превышает данную величину в 6 - 10 раз по сравнению с КТР и другими сорбентами.

При pH 5 прочность и скорость связывания для всех сорбентов находятся примерно в одном диапазоне и составляют 4,37; 1,83 для КТР и 3,64; 2,00 для ГТ соответственно.

Таким образом, полученные значения коэффициентов связывающей ёмкости и интенсивности сорбции указывают на высокую прочность и быструю скорость связывания ионов кадмия ГК и КТР, соизмеримую с аналогичным показателем для коммерческих энтеросорбентов.

Заключение

Применение и эффективное действие анализируемых коммерческих энтеросорбентов, ГК и КТР, имеющих высокие значения практически всех показателей процесса адсорбции при заданных значениях pH, происходит в промежуточной и нижней частях желудка, с диапазоном pH 3-6.

На основании проведенной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Применение моделей Ленгмюра и Фрейндлиха обоснованно к описанию процессов сорбции ионов кадмия предлагаемыми природными сорбентами и фармацевтическими сорбентами.

2. Костная ткань рогов северного оленя и гуминовые кислоты проявляют достаточно высокую адсорбционную активность по отношению к ионам кадмия.

3. Максимальная сорбционная активность КТР при pH 5 по сравнению с другими исследуемыми образцами доказывает, что адсорбция ионов Cd^{2+} точнее всего описывается уравнением Ленгмюра и носит мономолекулярный характер.

4. Для образцов ГК максимальные величины степени сродства сорбентов к Cd^{2+} выявлены при pH 4, а для коммерческих препаратов – при pH 5.

5. Высокая прочность связывания ионов кадмия ГК и КТР при pH 4 свидетельствует о протекании процесса связывания Cd^{2+} в одинарном гетерогенном слое адсорбентов. При pH 5 данные показатели имеют одинаковые значения практически для всех исследуемых сорбентов.

6. Сорбционная активность, степень сродства сорбента к сорбтиву, а также прочность и скорость связывания ионов кадмия, говорит о возможном применении ГК, КТР в качестве доступных и экономически оправданных энтеросорбентов.

Исходя из высоких значений величины предельной адсорбции, коэффициента β , характеризующего сродство сорбента к сорбтиву, а также достоверного значения коэффициента корреляции можно сделать вывод, что такие природные энтеросорбенты, как измельчённая костная ткань рогов северного оленя, препараты гуминовых кислот можно использовать в качестве эффективного энтеросорбента при интоксикации солями кадмия.

Информация о спонсорстве. Работа проведена за счет гранта Российского научного фонда № 25-25-20181, <https://rscf.ru/project/25-25-20181>.

Список литературы

1. Айвазова Е. А., Журавлева Е. А., Корельская Т. А. (2023). Сравнение сорбционной способности некоторых энтеросорбентов, препаратов гуминовых кислот и их натриевых солей в отношении ионов Cd^{2+} . *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*, 4(54), 122-138. <https://doi.org/10.26456/vtchem2023.4.15>. EDN: <https://elibrary.ru/KRSENE>.
2. Айвазова Е. А., Корельская Т. А., Журавлева Е. А. (2025). Сравнение сорбционных характеристик размельченной костной ткани рогов северного оленя и полисорба в отношении ионов свинца. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*, 2(60), 74-88. <https://doi.org/10.26456/vtchem2025.2.9>. EDN: <https://elibrary.ru/SDHDAG>.

3. Айвазова Е.А., Журавлева Е.А., Корельская Т.А., Незговоров Д.В. (2023). Способ применения измельченных рогов северного оленя в качестве сорбентов. Патент на изобретение RU 2790060 C1, 14.02.2023. Заявка № 2022108943 от 04.04.2022. EDN: <https://elibrary.ru/MUYNYT>.
4. Замышляева Е. Д., Летенкова И. В. (2022). Исследование адсорбции ионов кадмия (II) из водных растворов березовыми опилками. *Дни науки и инноваций НовГУ: Материалы XXI Всероссийской научной конференции преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ*, 76-80. <https://doi.org/10.34680/978-5-89896-816-8/2022.DN-4.13>. EDN: <https://elibrary.ru/JKASDZ>.
5. Зубова Н. А., Майер Л. В., Корельская Т. А. (2023). Гуминовые кислоты почвенных горизонтов торфа верховых болот Приморского района Архангельской области. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*, 4(54), 114-121. <https://doi.org/10.26456/vtchem2023.4.14>. EDN: <https://elibrary.ru/WPNAGS>.
6. Корельская Т. А., Журавлева Е. А., Айвазова Е. А. (2023). Сорбционная способность образцов гуминовых кислот и их натриевых солей в отношении ионов Cd^{2+} . *Химия растительного сырья*, 1, 33-41. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230111391>. EDN: <https://elibrary.ru/FRCNPJ>.
7. Корельская Т. А., Журавлева Е. А., Айвазова Е. А. (2023). Сравнительная характеристика сорбционной активности гуминовых кислот верхового торфа Архангельской области и некоторых энтеросорбентов в отношении ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} . *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*, 1(51), 83-93. <https://doi.org/10.26456/vtchem2023.1.9>. EDN: <https://elibrary.ru/PKZPHP>.
8. Мазмаева А. М., Староста М. И. (2025). Энтеросорбенты для адсорбции ионов меди (II). *Тенденции развития науки и образования*, 122(4), 50-54. EDN: <https://elibrary.ru/KEAZNA>.
9. Николаев В.Г. (2007). Энтеросорбция: состояние вопроса и перспективы на будущее. *Вестник проблем биологии и медицины*, 4, 7-17.
10. Орлова Е. А., Левашова О. А., Дружинина Т. А., Сысоева А. С. (2024). Адсорбционная активность различных энтеросорбентов. Чем должен руководствоваться врач при выборе препарата для энтеросорбции. *Практическая аллергология*, 2, 36-44. https://doi.org/10.46393/27129667_2024_2_36-44. EDN: <https://elibrary.ru/EXDIHE>.
11. Попова И. А., Елисеев М. Д., Зубова Е. О. (2023). Сравнение сорбционной активности энтеросорбентов и гуминовых кислот в отношении ионов меди. *Бюллетень Северного государственного медицинского университета*, 2(50), 66-71. EDN: <https://elibrary.ru/LSTYXG>.

12. Учайкин В.Ф., Новокшенов А.А., Соколова Н.В. (2005). Энтеросорбция — эффективный метод этиопатогенетической терапии острых кишечных инфекций. *Детские инфекции*, 3, 39-43. EDN: <https://elibrary.ru/HRPAYL>.
13. Учайкин В.Ф., Новокшенов А.А., Соколова Н.В., Бережкова Т.В. (2008). Энтеросорбция – роль энтеросорбентов в комплексной терапии острой и хронической гастроэнтерологической патологии. Пособие для врачей, 24 с.
14. Хотимченко Ю.С., Кропотов А.В. (1999). Применение энтеросорбентов в медицине. *Тихоокеанский медицинский журнал*, 2, 84-89. EDN: <https://elibrary.ru/VTFHWP>.
15. Токмалаев А.К. (2011). Применение энтеросорбентов в лечении острых кишечных инфекций. *ПМЖ*, (32), 2096. https://www.rmj.ru/articles/infektsionnye_bolezni/Primenenie_enterosorbentov_v_lechenii_ostryh_kishechnyh_infekciy/

References

1. Aivazova, E. A., Zhuravleva, E. A., & Korelskaya, T. A. (2023). Comparison of the sorption capacity of certain enterosorbents, humic acid preparations, and their sodium salts with respect to Cd²⁺ ions. *Vestnik of Tver State University. Series: Chemistry*, 4(54), 122-138. <https://doi.org/10.26456/vtchem2023.4.15>. EDN: <https://elibrary.ru/KRSENE>.
2. Aivazova, E. A., Korelskaya, T. A., & Zhuravleva, E. A. (2025). Comparison of sorption characteristics of crushed bone tissue of reindeer antlers and Polysorb with respect to lead ions. *Vestnik of Tver State University. Series: Chemistry*, 2(60), 74-88. <https://doi.org/10.26456/vtchem2025.2.9>. EDN: <https://elibrary.ru/SDHDAG>.
3. Aivazova, E. A., Zhuravleva, E. A., Korelskaya, T. A., & Nezgovorov, D. V. (2023). Method of using crushed reindeer antlers as sorbents. Patent for invention RU 2790060 C1, 14.02.2023. Application No. 2022108943 dated 04.04.2022. EDN: <https://elibrary.ru/MUYHYT>.
4. Zamyshlyayeva, E. D., & Letenkova, I. V. (2022). Study of the adsorption of cadmium (II) ions from aqueous solutions by birch sawdust. *Days of Science and Innovations of NovSU: Proceedings of the XXI All-Russian Scientific Conference of Teachers, Postgraduates and Students of NovSU*, 76-80. <https://doi.org/10.34680/978-5-89896-816-8/2022.DN-4.13>. EDN: <https://elibrary.ru/JKASDZ>.
5. Zubova, N. A., Mayer, L. V., & Korelskaya, T. A. (2023). Humic acids of soil horizons of raised bog peat in the Primorsky district of the Arkhangelsk region. *Vestnik of Tver State University. Series: Chemistry*, 4(54), 114-121. <https://doi.org/10.26456/vtchem2023.4.14>. EDN: <https://elibrary.ru/WPNAGS>.
6. Korelskaya, T. A., Zhuravleva, E. A., & Aivazova, E. A. (2023). Sorption capacity of samples of humic acids and their sodium salts with respect to Cd²⁺ ions. *Chem-*

- istry of Plant Raw Material*, 1, 33-41. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230111391>. EDN: <https://elibrary.ru/FRCNPJ>.
7. Korelskaya, T. A., Zhuravleva, E. A., & Aivazova, E. A. (2023). Comparative characteristics of sorption activity of humic acids of raised bog peat of the Arkhangelsk region and some enterosorbents with respect to Cu²⁺ and Pb²⁺ ions. *Vestnik of Tver State University. Series: Chemistry*, 1(51), 83-93. <https://doi.org/10.26456/vtchem2023.1.9>. EDN: <https://elibrary.ru/PKZPHP>.
 8. Mazmaeva, A. M., & Starosta, M. I. (2025). Enterosorbents for the adsorption of copper (II) ions. *Trends in the Development of Science and Education*, 122(4), 50-54. EDN: <https://elibrary.ru/KEAZNA>.
 9. Nikolaev, V. G. (2007). Enterosorption: Current state of the problem and future prospects. *Bulletin of Biological and Medical Problems*, 4, 7-17.
 10. Orlova, E. A., Levashova, O. A., Druzhinina, T. A., & Sysoeva, A. S. (2024). Adsorption activity of various enterosorbents. What should guide a physician in choosing an enterosorbent preparation. *Practical Allergology*, 2, 36-44. https://doi.org/10.46393/27129667_2024_2_36-44. EDN: <https://elibrary.ru/EXDIHE>.
 11. Popova, I. A., Eliseev, M. D., & Zubova, E. O. (2023). Comparison of sorption activity of enterosorbents and humic acids with respect to copper ions. *Bulletin of the Northern State Medical University*, 2(50), 66-71. EDN: <https://elibrary.ru/LSTYXG>.
 12. Uchaikin, V. F., Novokshonov, A. A., & Sokolova, N. V. (2005). Enterosorption – an effective method of etiopathogenetic therapy of acute intestinal infections. *Children's Infections*, 3, 39-43. EDN: <https://elibrary.ru/HRPAYL>.
 13. Uchaikin, V. F., Novokshonov, A. A., Sokolova, N. V., & Berezhkova, T. V. (2008). Enterosorption – the role of enterosorbents in the complex therapy of acute and chronic gastroenterological pathology. *Guidelines for physicians*, 24 p.
 14. Khotimchenko, Yu. S., & Kropotov, A. V. (1999). The use of enterosorbents in medicine. *Pacific Medical Journal*, 2, 84-89. EDN: <https://elibrary.ru/VTFHWP>.
 15. Tokmalaev, A. K. (2011). The use of enterosorbents in the treatment of acute intestinal infections. *RMJ*, (32), 2096. https://www.rmj.ru/articles/infektsionnye_bolezni/Primenenie_enterosorbentov_v_lechenii_ostryh_kishechnyh_infekciy/

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

Айвазова Е.А.: концепция и дизайн исследования.

Журавлева Е.А., Корельская Т.А.: проведение лабораторных исследований

Онохина Н.А.: сбор и статистическая обработка материала.

Майер Л.В., Zubova Н.А.: анализ и интерпретация данных, написание текста.

Айвазова Е.А., Корельская Т.А.: финальное редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

Elena A. Aivazova: research concept and design.

Ekaterina A. Zhuravleva, Tatyana A. Korelskaya: conducting laboratory studies.

Natalia A. Onokhina: data collection and statistical processing.

Lyudmila V. Mayer, Natalia A. Zubova: data analysis and interpretation, writing the text.

Elena A. Aivazova, Tatyana A. Korelskaya: final editing.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Зубова Наталья Александровна, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры общей и биоорганической химии

Северный государственный медицинский университет

пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация

natalja.matonina@yandex.ru

Майер Людмила Владимировна, канд. хим. наук, доцент кафедры общей и биоорганической химии

Северный государственный медицинский университет

пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация

mayer58@mail.ru

Корельская Татьяна Александровна, канд. хим. наук, доцент кафедры общей и биоорганической химии

Северный государственный медицинский университет

пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация

takorelskaya@yandex.ru

Журавлева Екатерина Александровна, канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры общей и биоорганической химии

Северный государственный медицинский университет

пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация

zhuravleva.ek@yandex.ru

Айвазова Елена Анатольевна, канд. биол. наук, доцент, зав. кафедрой общей и биоорганической химии

Северный государственный медицинский университет

пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация

aivazowa@yandex.ru

Онохина Наталья Александровна, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры общей и биорганической химии
*Северный государственный медицинский университет
пр. Троицкий, 51, г. Архангельск, 163000, Российская Федерация
onohina76@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalia A. Zubova, PhD in Chemistry, Associate Professor; Associate Professor of General and Bioorganic Chemistry Department
*Northern State Medical University
51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation
natalja.matonina@yandex.ru
SPIN-code: 1249-9729
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6572-0733>*

Lyudmila V. Mayer, PhD in Chemistry, Associate Professor; Associate Professor of General and Bioorganic Chemistry Department
*Northern State Medical University
51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation
mayer58@mail.ru
SPIN-code: 1249-9729
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3782-2038>*

Tatyana A. Korelskaya, PhD in Chemistry, Associate Professor; Associate Professor of General and Bioorganic Chemistry Department
*Northern State Medical University
51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation
takorelskaya@yandex.ru
SPIN-code: 8128-5129
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3883-998X>*

Ekaterina A. Zhuravleva, PhD in Biology, Associate Professor; Associate Professor of General and Bioorganic Chemistry Department
*Northern State Medical University
51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation
zhuravleva.ek@yandex.ru
SPIN-code: 4130-4819
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7932-0717>*

Elena A. Aivazova, PhD in Biology, Associate Professor; Head of General and Bioorganic Chemistry Department

Northern State Medical University

51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation

ayvazowa@yandex.ru

SPIN-code: 5449-3899

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-7410>

Natalia A. Onokhina, PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Associate Professor of General and Bioorganic Chemistry

Northern State Medical University

51, Troitsky Ave., Arkhangelsk, 163000, Russian Federation

onokhina76@mail.ru

SPIN-code: 5906-1730

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5273-8686>

Поступила 21.07.2026

После рецензирования 03.09.2026

Принята 01.10.2026

Received 21.07.2026

Revised 03.09.2026

Accepted 01.10.2026