

Тунакова Ю.А.¹, Галимова А.Р.¹, Валиев В.С.², Файзуллин Р.И.³, Шром И.А.¹

Разработка и оценка эффективности комбинаций биополимерных и минеральных энтеросорбентов в отношении металлов

¹ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ», 420111, г. Казань, Российская Федерация;

²Институт проблем экологии и недропользования, ГНБУ «Академия наук Республики Татарстан», 420087, г. Казань, Российская Федерация;

³ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420012, г. Казань, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Для защиты населения в условиях полиметаллического загрязнения среды обитания используется метод энтеросорбции, целью которого является выведение из организма избыточного количества поступающих металлов. В специализированной литературе в основном описывается клиническая эффективность энтеросорбентов, тогда как информации об их сорбционной ёмкости крайне недостаточно. Одним из подходов для повышения сорбционной ёмкости моноэнтеросорбентов является использование комбинаций энтеросорбентов с различными механизмами сорбции. **Цель исследования** — провести сравнительную оценку сорбционной ёмкости различных типов энтеросорбентов, поиск оптимальных комбинаций биополимерных и минеральных энтеросорбентов, характеризующихся более высокой эффективной сорбционной ёмкостью, по сравнению с моноэнтеросорбентами.

Материал и методы. Экспериментальным путём оценивали сорбционную ёмкость энтеросорбентов. Для создания комбинаций определяли сорбционную ёмкость основных типов биополимерных и минеральных энтеросорбентов. Из биополимерных энтеросорбентов, по результатам тестирования моноэнтеросорбентов, выбраны хитинсодержащие препараты «Хитозан» и «Микотон» для создания комбинаций. Были выбраны наиболее распространённые минеральные энтеросорбенты: диоктаэдрический смектит («Смекта»), мелкодисперсный диоксид кремния («Полисорб МП»), активированный уголь, гранулированный цеолит на основе минерала осадочно-вулканического происхождения с содержанием клиноптилолита до 95% — ZeoDetox. Для моделирования сложного состава внутренней среды организма предложено использование молочной сыворотки, которая представляет собой многокомпонентную матрицу, состоящую из воды с растворёнными в ней минералами и органической фракцией (белки, углеводы, жиры и витамины).

Результаты. Экспериментальным путём разработан способ получения комбинаций энтеросорбентов, позволяющий получать их оптимальную однородную смесь, с качественно новыми свойствами. Эффективность комбинаций энтеросорбентов достигалась в результате тестирования моноэнтеросорбентов, с оценкой сорбционной ёмкости. Показана возможность использования молочной сыворотки, моделирующей жидкую фазу, в которой осуществляются процессы сорбции в организме, для оценки сорбционной ёмкости комбинаций энтеросорбентов. Созданные комбинации энтеросорбентов показали более высокую сорбционную ёмкость в отношении исследуемых металлов, по сравнению с отдельными моноэнтеросорбентами.

Ограничения исследования. Эксперимент проводился *in vitro*, что, с одной стороны, снимает этические ограничения, но формирует определённые качественные ограничения трактовки результатов и эффективность полученных сорбционных материалов в качестве энтеросорбентов.

Заключение. При поступлении высоких концентраций металлов, оптимальным составом являются смеси, сочетающие биополимеры с установленной высокой сорбционной ёмкостью и один из минеральных энтеросорбентов. Так, комбинированный энтеросорбент на основе цеолита и активированного угля показал относительно высокую абсолютную эффективность, по сравнению с другими комбинациями минеральных энтеросорбентов. При этом он обладает высокой селективностью, что в сочетании с низкой гидрофильтрностью является оптимальным для регулярного применения.

Ключевые слова: металлы; микроэлементный дисбаланс; энтеросорбция; комбинации энтеросорбентов; сорбционная ёмкость

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Тунакова Ю.А., Галимова А.Р., Валиев В.С., Файзуллин Р.И., Шром И.А. Разработка и оценка эффективности комбинаций биополимерных и минеральных энтеросорбентов в отношении металлов. *Токсикологический вестник*. 2025; 33(4): 229–236. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2025-33-4-229-236> <https://elibrary.ru/apunrf>

Для корреспонденции: Галимова Алина Раисовна, e-mail: ARGalimova@kai.ru

Участие авторов: Тунакова Ю.А. – концепция и дизайн исследования; Галимова А.Р. – проведение экспериментальных исследований; Валиев В.С. – планирование исследования; Файзуллин Р.И. – анализ и интерпретация полученных данных; Шром И.А. – анализ литературы. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-03-2024-067 от 17.01.2024 г. (номер темы FZSU-2023-0005).

Поступила в редакцию: 24 декабря 2024 / Поступила после доработки: 31 марта 2025 / Принята в печать: 14 июля 2025 / Опубликована: 29 августа 2025

Yulia A. Tunakova¹, Alina R. Galimova¹, Vsevolod S. Valiev², Rashat I. Faizullin³, Ilya A. Shrom¹

Development and evaluation of the effectiveness of combinations of biopolymer and mineral enterosorbents in relation to metals

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, 420111, Kazan, Russian Federation;

²Institute of Ecology and Subsoil Use Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 420087, Kazan, Russian Federation;

³Kazan (Volga Region) Federal University, 420012, Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To protect the population in conditions of polymetallic pollution of the environment, the enterosorption method is used, the purpose of which is to remove excess amounts of incoming metals from the body. Specialized literature mainly describes the clinical effectiveness of enterosorbents, while information on their sorption capacity is extremely insufficient. One of the approaches to increasing the sorption capacity of monoenterosorbents is the use of combinations of enterosorbents with different sorption mechanisms.

The purpose of the study is to conduct a comparative assessment of the sorption capacity of various types of enterosorbents, and to search for optimal combinations of biopolymer and mineral enterosorbents with higher effective sorption capacity compared to monoeutrosorbents.

Material and methods. The sorption capacity of enterosorbents was estimated experimentally. To create combinations, the sorption capacity of the main types of biopolymer and mineral enterosorbents was determined. Of the biopolymer enterosorbents, based on the results of testing monoenterosorbents, chitin-containing preparations “Chitosan” and “Mikoton” were selected to create combinations. The most common mineral enterosorbents were selected to create combinations: dioctahedral smectite (“Smecta”), finely dispersed silicon dioxide (“Polysorb MP”), activated carbon, granulated zeolite based on a mineral of sedimentary-volcanic origin with a clinoptilolite content of up to 95% “ZeoDetox”. To model the complex composition of the internal environment of the body, it is proposed to use whey, which is a multicomponent matrix consisting of water with minerals and an organic fraction (proteins, carbohydrates, fats and vitamins) dissolved in it.

Results. A method for obtaining combinations of enterosorbents has been developed experimentally, allowing one to obtain their optimal homogeneous mixture with qualitatively new properties. The effectiveness of combinations of enterosorbents was determined based on the results of testing monoenterosorbents, with an assessment of the sorption capacity. The possibility of using whey, which simulates the liquid phase in which sorption processes occur in the body, to assess the sorption capacity of combinations of enterosorbents has been demonstrated. The created combinations of enterosorbents showed a higher sorption capacity with respect to the metals under study, compared to individual monoenterosorbents.

Limitations. The experiment was conducted *in vitro*, which, on the one hand, removes ethical restrictions, but forms certain qualitative limitations in the interpretation of the results of the efficiency of the obtained sorption materials as enterosorbents.

Conclusion. When high concentrations of metals are received, the optimal composition is a mixture combining biopolymers with established high sorption capacity and one of the mineral enterosorbents. Thus, a combined enterosorbent based on zeolite and activated carbon showed a relatively high absolute efficiency compared to other combinations of mineral enterosorbents. At the same time, it has high selectivity, which, in combination with low hydrophilicity, is optimal for regular use.

Keywords: metals; microelement imbalance; enterosorption; combinations of enterosorbents; sorption capacity

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of a biomedical ethics committee opinion or other documents.

For citation: Tunakova Yu.A., Galimova A.R., Valiev V.S., Faizullin R.I., Shrom I.A. Development and evaluation of the effectiveness of combinations of biopolymer and mineral enterosorbents in relation to metals. *Toksikologicheskiy vestnik/ Toxicological review.* 2025; 33(4): 229–236. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2025-33-4-229-236> <https://elibrary.ru/apunrf>

For correspondence: Alina R. Galimova, e-mail: ARGalimova@kai.ru

Authors' contributions: Tunakova Y.A. – concept and design of the study; Galimova A.R. – conducting experimental studies; Valiev V.S. – planning the study; Faizullin R.I. – analysis and interpretation of the obtained data; Shrom I.A. – literature analysis. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the fulfillment of obligations under Agreement No. 075-03-2024-067 dated 17.01.2024 (topic number FZSU-2023-0005).

Received: December 24, 2024 / Revised: March 31, 2025 / Accepted: July 14, 2025 / Published: August 29, 2025

Введение

Население промышленно развитых городов находится под постоянным полиметаллическим воздействием, вызванным различными антропогенными источниками. Металлы имеют длительный период полувыведения из организма и при хроническом воздействии оказывают существенное токсическое действие на весь организм [1–4].

В последние десятилетия метод энтеросорбции стал одним из основных, используемых для удаления избыточно поступающих в организм человека металлов. Энтеросорбенты могут позволить обеспечивать связывание и дальнейшее выведение из организма человека токсинов различного происхождения и, в том числе, металлов [5–10].

Основной характеристикой энтеросорбентов является показатель сорбционной ёмкости — то количество вещества, которое может поглотить сорбент на единицу своей массы. Лечебный эффект энтеросорбента достигается за счёт физико-химических свойств, в частности структуры и размера пор. Выбор энтеросорбента с различной пористостью позволяет влиять на избирательность сорбции тех или иных металлов. Например, микропористые энтеросорбенты максимально эффективны при острых отравлениях, тогда как терапия микроэлементного дисбаланса более эффективна с использованием энтеросорбентов с мезо- и макропористой структурой [11–15].

Для выведения из организма хронически поступающих в небольших дозах металлов часто рекомендуются биополимерные энтеросорбенты, например, такие, как «Хитозан» [16], энtero-

сорбенты из синтетических полимеров, а также минеральные природные энтеросорбенты [17]. Перспективным направлением считается также создание комбинаций энтеросорбентов с различными механизмами сорбции [18–20]. Сочетание полимерных и минеральных энтеросорбентов позволяет значительно повысить сорбционную ёмкость по сравнению с моноэнтеросорбентами и добиться селективности действия [11–17]. Известны комбинированные энтеросорбенты, например, «Белый уголь» (диоксид кремния + микрокристаллическая целлюлоза), «Альгинат кальция» (альгиновая кислота + клетчатка и кальций) и др. [21] На сегодняшний день проводятся исследования по разработке новых комбинаций энтеросорбентов, различной структуры и состава, осуществляющих связывание и выведение металлов из организма путём адсорбции, ионообмена и комплексообразования [22–24].

Цель исследования — проведение сравнительной оценки сорбционной ёмкости различных типов энтеросорбентов, а также поиска оптимальных комбинаций биополимерных и минеральных энтеросорбентов, характеризующихся более высокой эффективной сорбционной ёмкостью, по сравнению с моноэнтеросорбентами.

Материал и методы

Для повышения адекватности оценки сорбционной ёмкости исследуемых минеральных и биополимерных энтеросорбентов, по отношению к ряду наиболее распространённых эссенциальных и токсичных металлов, ставилась задача модели-

рования условий внутренней среды организма человека, при которых происходит энтеросорбция. Для моделирования сложного состава гастродуodenального содержимого организма использовали молочную сыворотку, которая представляет собой многокомпонентную матрицу, состоящую из воды с растворёнными в ней минералами и органической фракцией (белки, углеводы, жиры и витамины). Белки молочной сыворотки представляют собой глобулярные белки, состоящие на 65% из β -лактоглобулина, на 25% – α -лактальбумина и на 8% – из альбумина. В работах [23, 24] показано, что такие многокомпонентные растворы позволяют адекватно моделировать сложный состав различных жидкостей организма человека и условия его внутренней среды.

Для создания комбинаций были выбраны минеральные энтеросорбенты, наиболее доступные, включающие все виды площиади активной поверхности сорбции и химической структуры: диоктаэдрический смектит («Смекта»), мелкодисперсный диоксид кремния («Полисорб МП»), гранулированный цеолит («ZeoDetox»), активированный уголь. Из биополимерных энтеросорбентов для создания комбинаций в дальнейшем выбраны «Хитозан» и «Микотон» (РФ) как биополимерные энтеросорбенты, показавшие наибольшую сорбционную ёмкость в результате ранних исследований [25].

Способ создания комбинаций энтеросорбентов был подобран экспериментально. На первом этапе осуществляли смешивание рекомендуемых суточных доз каждого исследуемого биополимерного и минерального энтеросорбента. Таким образом, весовые пропорции 1 части энтеросорбентов при подготовке смесей составили: «Полисорб МП» – 1 г, «Смекта» – 3 г, «Хитозан» – 0,45 г, «Микотон» – 0,5 г, Цеолит – 1 г, активированный уголь – 1 г. Комбинации создавали на основе водных суспензий энтеросорбентов, в пропорциях их максимальной разовой дозы, установленной производителем. Создавали следующие комбинации энтеросорбентов: «Смекта + Хитозан» (№ 1), «Смекта + Микотон» (№ 2), «Полисорб МП + Хитозан» (№ 3), «Полисорб МП+Микотон» (№ 4) и «Цеолит + активированный уголь» (№ 5).

Водные суспензии готовили на основе дистиллированной воды. Навески сорбентов заливали 10-кратным объёмом (по весу) воды при комнатной температуре и смешивали в исследуемых комбинациях в одном растворе для обеспечения однородности. Полученную суспензию фильтровали через бумажный фильтр и высушивали на фильтре при комнатной температуре в течение

1 сут. Для эксперимента были отобраны навески полученной смеси массой по 2 г.

Для оценки сорбционной ёмкости комбинированных энтеросорбентов пропорциональные навески полученных комбинаций помещали в мерные колбы, заливали 10-кратным объёмом модельных растворов заданной концентрации и постоянно встряхивали на лабораторном встряхивателе в течение 1 ч, а затем фильтровали через бумажный фильтр. Модельные растворы нитратов выбранных металлов (Fe, Cu, Cd, Zn) для исследования комбинаций сорбентов готовили соответствующим разведением стандартных образцов металлов в молочной сыворотке. Использовали растворы солей, в концентрациях 0,5 (A); 1,0 (B); 1,5 (C); 2,0 мг/л (D) каждого металла. При выборе диапазона концентраций металлов в растворах для исследования сорбционной ёмкости комбинаций энтеросорбентов использовали полученные в данном исследовании результаты тестированияmonoэнтеросорбентов в расширенном диапазоне концентраций, что подробно описано в работе [25]. Результаты предыдущих исследований позволили сократить ряд используемых при тестировании сорбционной ёмкости до концентраций в 2,0 мг/л.

Следует отметить, что были приготовлены комбинированные растворы, содержащие все исследуемые металлы, при этом сама молочная сыворотка также содержала некоторое количество железа и, особенно, цинка, что учитывалось при расчётах эффективности сорбции. Используемый ряд концентраций металлов обеспечивал оценку эффективности энтеросорбентов при разных дозах и экспозициях в пределах физиологических величин [22, 23].

Остаточные концентрации исследуемых металлов в растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе AAnalyst 400. Результат пересчитывали на абсолютное количество адсорбированного металла (Q_{Me}), согласно [11] по формуле (1):

$$Q_{Me} = \frac{C_1 \cdot V_1 - C_2 \cdot V_2}{m}, \quad (1)$$

где C_1 , C_2 – концентрации металла в растворе до и после сорбции, мкг/мл; V_1 , V_2 – объёмы растворов до и после сорбции, мл; m – масса энтеросорбента (навеска), г.

По полученным данным строили изотермы Ленгмюра. Построение изотерм, отражающих зависимости между количеством адсорбированного металла и концентрациями соли металла в растворах, проводили в соответствии с работами [22, 26].

Таблица 1 / Table 1

Суммарная величина адсорбции различных парных комбинаций энтеросорбентов, по отношению к растворам металлов (мкг/г)
Total adsorption value of various paired combinations of enterosorbents, in relation to metal solutions (µg/g)

Композиты сорбентов Sorbent composites	Модельные растворы солей (концентрация металла, мг/л) Model solutions of salts (metal concentration, mg/L)			
	A (0,5)	B (1,0)	C (1,5)	D (2,0)
«Смекта + Хитозан» / "Smekta + Chitosan"	10,78	55,83	130,5	192,7
«Смекта + Микотон» / "Smekta + Mikoton"	-22,24	-21,54	30,47	45,13
«Полисорб + Хитозан» / "Polysorb + Chitosan"	13,84	47,59	66,45	93,9
«Полисорб + Микотон» / "Polysorb + Mikoton"	-69,69	-15,69	45,46	85,8
«Цеолит + активированный уголь» / "Zeolite + activated carbon"	5,95	33,09	86,67	109,41

Эффективность сорбции (%) комбинаций энтеросорбентов определяли как среднее из значений D , рассчитанных для каждой концентрации модельного раствора по формуле (2):

$$D = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100. \quad (2)$$

Следует отметить, что концентрации C_1 и C_2 (до и после сорбции) определяли с учётом содержания металлов в молочной сыворотке.

Результаты

Была проведена оценка величины сорбционной ёмкости полученных комбинаций энтеросорбентов в отношении растворов различных металлов в молочной сыворотке. Результаты расчёта суммарной величины адсорбции всех исследуемых металлов показаны в табл. 1.

На рисунке представлены сравнительные кривые зависимостей величины адсорбции от концентрации катионов металлов в растворах молочной сыворотки, полученные для разных энтеросорбентов.

В результате проведённого исследования установлено, что для изотерм сорбции Cu и Zn (см. рисунок, б и г) на исследуемых концентрациях характерен линейный вид, для Cd и Fe отмечена выраженная нелинейность кривых, обусловленная снижением, при достаточно высоких концентрациях металлов в растворе, количества адсорбированного вещества, что соответствует насыщению поверхности сорбента молекулами сорбата (см. рисунок, а и в). При этом процессы насыщения не характерны для комбинированного энтеросорбента на основе цеолита, здесь наблюдается либо экспоненциальная зависимость (рис. 1, 3), либо линейная (рис. 2, 4).

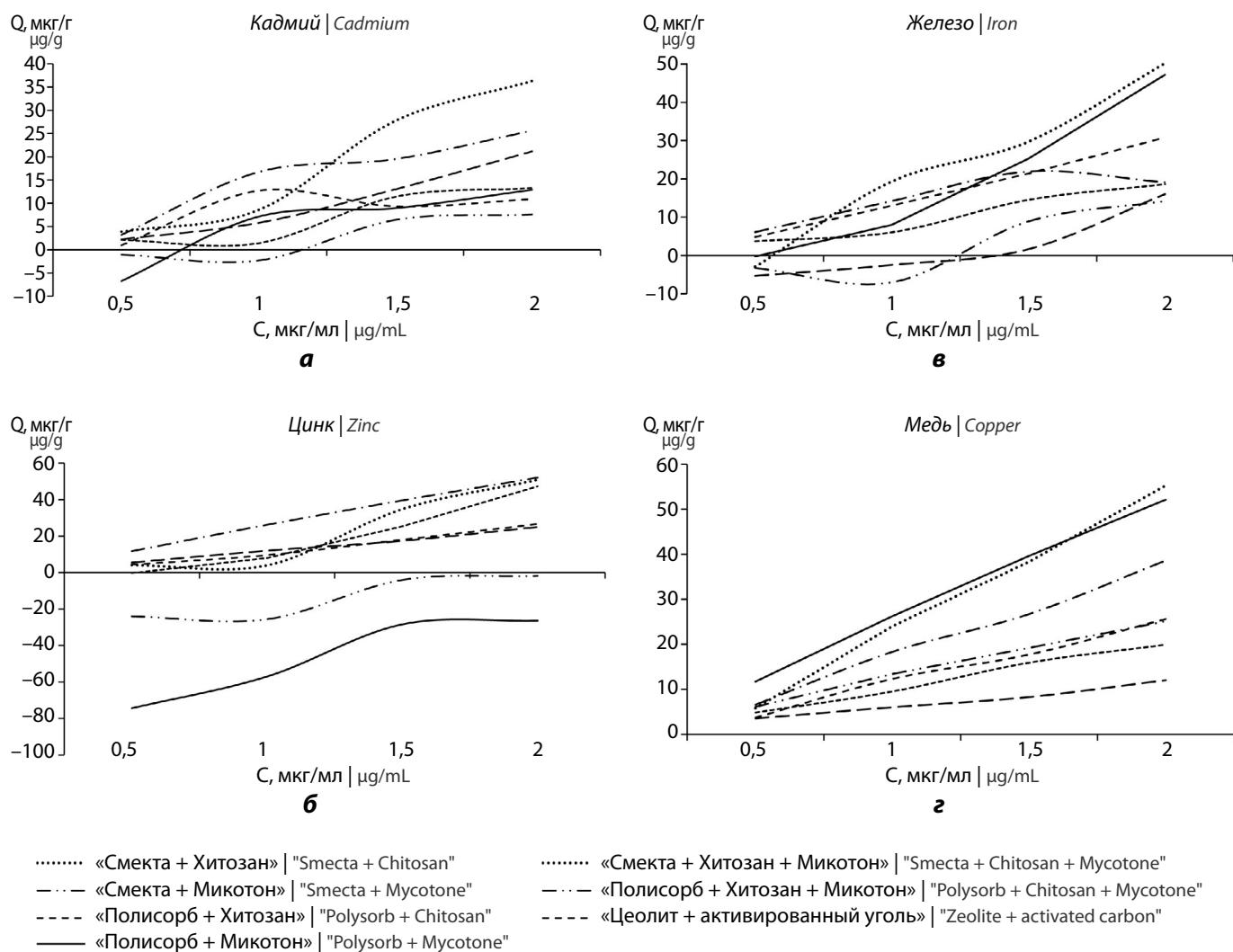
Следует особо подчеркнуть, что рассчитанное количество адсорбированного вещества в

большой степени определяется не только процессами непосредственной сорбции этого вещества, но и объёмом поглощённой жидкой фазы. Безусловно, это также снижает дозу, так как снижает активную массу сорбата, сокращая экспозицию и ускоряя элиминацию металлов из организма, что очень важно при острых отравлениях. Вместе с этим, при энтеросорбции веществ, поступающих регулярно в относительно небольших дозах, важна регуляция именно их концентрации в гастроудоденальном содержимом. При этом сорбенты, удерживающие и выводящие сорбат вместе с жидкой фазой, как правило, неселективны, следствием чего является потеря организмом и многих эссенциальных микроэлементов, что в случае систематического использования может приводить к микроэлементному дисбалансу организма. В связи с этим оценка эффективности тех или иных комбинированных энтеросорбентов должна осуществляться с учётом этого фактора.

Для этой цели мы использовали две дополнительные характеристики: эффективность сорбции (D), не зависящей от объёмов поглощённой жидкости, а также непосредственную оценку этих объёмов, выраженных в процентах от первоначального количества.

В табл. 2 приведены значения эффективности сорбции D , рассчитанные лишь по начальным и конечным значениям концентраций металлов в модельных растворах. Отдельно указан объём поглощённой жидкости, выраженный в % от исходного. Следует отметить, что при этом оценивается объём поглощённой и удерживаемой сорбентом жидкости, что обеспечивалось длительным (не менее 1 ч) выдерживанием составов в фильтровальной воронке.

Как видно из табл. 2, наибольшей гидрофильтруемостью обладают сорбенты, содержащие в своем составе биополимеры, наименьшей — на основе



Зависимость величины адсорбции (Q , мкг/г) металлов от концентрации (C , мкг/мл) катионов металлов в растворах:
 а – кадмия; б – цинка; в – железа; г – меди.

Dependence of the adsorption value (Q , $\mu\text{g/g}$) of metals on the concentration (C , $\mu\text{g/mL}$) of metal cations in solutions:
 а – cadmium; б – zinc; в – iron; г – copper.

Таблица 2 / Table 2

Эффективность сорбции комбинированных энтеросорбентов и относительный объём (%) поглощённого ими модельного раствора

Sorption efficiency of combined enterosorbents and the relative volume of the model solution absorbed by them (%)

Состав комбинации Composition of the combination	Объём поглощенного раствора, % Volume of the absorbed solution, %	Металл / Metal				Среднее Average
		Cd	Zn	Fe	Cu	
«Смекта + Хитозан» / "Smekta + Chitosan"	72,5	45,8	91,1	69,4	93,3	74,9
«Смекта + Микотон» / "Smekta + Mycotone"	75,0	16,4	54,4	17,7	94,2	45,6
«Полисорб + Хитозан» / "Polysorb + Chitosan"	71,5	40,7	92,6	85,7	71,4	72,6
«Полисорб + Микотон» / "Polysorb + Mycotone"	76,0	16,2	39,8	39,2	94,6	47,4
«Цеолит + активированный уголь» "Zeolite + activated carbon"	39,0	54,2	63,4	18,8	69,3	51,4

минеральных энтеросорбентов, в частности цеолита. Соответственно, использование энтеросорбентов, на основе цеолита является предпочтительным в случаях длительного и регулярного применения, например, в условиях коррекции микроэлементного обмена или при хроническом пероральном поступлении металлов в организм.

Обсуждение

Комбинированный энтеросорбент на основе цеолита и активированного угля показал относительно высокую абсолютную эффективность по сравнению с другими композитами на основе минеральных энтеросорбентов — «Смекты» и «Полисорба». При этом он обладает высокой селективностью, что в сочетании с низкой гидрофильтностью является оптимальным для регулярного применения в условиях полиметаллического загрязнения на территории крупных городов.

В частности, по эффективности сорбции из многокомпонентных растворов такого токсичного металла, как кадмий, комбинированный энтеросорбент, состоящий из гранулированного цеолита и активированного угля, превосходит все биополимерные составы, уступая лишь сложному комплексу из смеси «Смекта + Хитозан». Комбинации сорбентов, имеющие в своём составе биополимерные компоненты («Микотон», «Хитозан») продемонстрировали хорошую эффективность по отношению ко всем исследуемым металлам. Однако эти же комбинации поглощают наибольшие объёмы растворов.

Ограничения исследования. Ограничением предлагаемого способа получения комбиниро-

ванных энтеросорбентов является условие, что смешиваемые сорбционные материалы способны образовывать взвеси в водной среде. Оценка эффективности сорбции полученных материалов ограничена сорбией растворов двухвалентных форм металлов в диапазоне концентраций 0,5–2 мг/л. Эксперимент проводился *in vitro*, что, с одной стороны, снимает этические ограничения, но формирует определённые качественные ограничения трактовки результатов эффективности полученных сорбционных материалов в качестве энтеросорбентов.

Заключение

Комбинированный энтеросорбент на основе цеолита и активированного угля показал относительно высокую абсолютную эффективность по сравнению с другими комбинациями минеральных энтеросорбентов. При этом он сохраняет высокую селективность цеолита, что в сочетании с низкой гидрофильтностью является оптимальным для регулярного применения. При поступлении избыточных концентраций металлов, оптимальным составом являются смеси, сочетающие биополимеры с установленной высокой сорбционной ёмкостью и один из минеральных энтеросорбентов.

Проведённое исследование является важным этапом для создания эффективных комбинаций энтеросорбентов, предназначенных для селективного выведения избыточных содержаний металлов из организма человека при хроническом поступлении на территории промышленно развитого города.

ЛИТЕРАТУРА (пп. 1–4, 6, 16 см. в References)

- Герникова Е.П., Лутцева А.И., Боковикова Т.Н., Мамашина Е.А., Биглова Ю.Р. Определение адсорбционной активности энтеросорбентов. *Ведомости научного центра экспертизы средств медицинского применения*. 2013; 4: 47–50. <https://elibrary.ru/rwvvad>
- Бондарев Е.В., Штырголь С.Ю., Дырявый С.Б. Применение энтеросорбентов в медицинской практике. *Провизор. Электронный ресурс*. 2008; 13: 45–9. <https://vk.cc/cNSN7n>
- Палий И.Г., Резниченко И.Г. Современный взгляд на проблему энтеросорбции: выбор оптимального препарата. *Новости медицины и фармации*. 2007; 11: 217.
- Урсова Н.И., Горелов А.В. Современный взгляд на проблему энтеросорбции. Оптимальный подход к выбору препарата. *Российский медицинский журнал*. 2006; 19: 1391–6.
- Щербаков П.Л., Петухов В.А. Сравнительная эффективность энтеросорбентов при диарее у детей. *Вопросы современной педиатрии*. 2005; 4(4): 86–90.
- Решетников В.И. Оценка адсорбционной способности энтеросорбентов и их лекарственных форм. *Химико-фармацевтический журнал*. 2003; 5(37): 28–32.
- Николаев В.Г., Михайловский С.В., Гурина Н.М. Современные энтеросорбенты и механизмы их действия: обзор. *Эфферентная терапия*. 2005; 4: 3–7.
- Хотимченко Ю.С., Ермак И.М., Бедняк А.Е., Хасина Э.И., Кропотов А.В., Коленченко Е.А., Сергущенко И.С., Хотимченко М.Ю., Ковалев В.В. Фармакология некрахмальных полисахаридов. *Вестник ДВОРАН*. 2005; 1: 72–82.
- Авалиани С.Л., Ревич Б.А., Захаров В.М. *Мониторинг здоровья человека и здоровья среды. Региональная экологическая политика*. М.: Изд-во центра экологической политики России; 2001.
- Устинова Т.М., Венгерович Н.Г., Чалых С.Н., Гусак Т.И. Повышение биодоступности биотехнологических и иммунобиологических лекарственных препаратов с использованием микросфер хитозана (обзор литературы). *Медлайн.ру*. 2022; 23: 217–29.
- Фомичев А.В., Сосюкин А.Е., Малышева Е.В., Литвинцев Б.С., Лапина Н.В., Пимбурский В.Ф., Чухарев А.Е. Настоящее и будущее применения энтеросорбентов в профилактике и лечении неблагоприятного воздействия соединений тяжелых металлов. *Токсикологический вестник*. 2020; 2: 41–6.
- Сидчикова Ф.Г., Галимова Р.К. Результаты исследования клинической эффективности энтеросорбента «Фильтрум-СТИ» при острых кишечных инфекциях у детей раннего возраста. *Сборник клинических исследований препаратов «Фильтрум-СТИ» и «Лактофильтрум». Часть II: Инфекционные заболевания*. М.; 2006: 9.
- Касаткина М.А. Получение биологически активных пленочных материалов на основе хитозана, модифицированных полифосфатом. *Химико-фармацевтический журнал*. 2016; 50(4): 32–9.
- Бабаян М.Л. Влияние полисахаридов на внутрикишечный метаболизм: физиологические аспекты и возможности клинического применения. *Лечебный врач*. 2011; 6: 92–5.
- Панфилова В.Н., Тарушенко Т.Е. Применение энтеросорбентов в клинической практике. *Педиатрическая фармакология*. 2012; 9(6): 34–9.
- Самохин А.П., Крыщенко В.С., Минкина Т.М., Шатовой А.А. Изотермы адсорбции цинка, меди и свинца черноземом обыкновенным при монометаллическом и полиметаллическом загрязнении. *Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде*. 2002; 1: 365–9.

23. Емельянов С.И., Брискин Б.С., Демидов Д.А., Демидова Т.И. Возможности энтеросорбции и эволюция энтеросорбентов для лечения хирургического эндотоксикоза. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2010; 11: 84–9.
24. Секун Д.М., Бутылин Ю.П., Стрелко В.В., Ромашов О.А. Влияние энтеросорбентов с различной химией поверхности на гомеостаз. В кн.: Внутриенная общая анестезия. Методы детоксикации. Тезисы докладов конференции. Киев – Ворошиловград; 1986: 156–9.
25. Тунакова Ю.А., Галимова А.Р., Валиев В.С., Шром И.А. Оценка сорбционной способности энтеросорбентов, применяемых для коррекции микрэлементного дисбаланса в организме. В кн.: Химия и инженерная экология — XXIV. Сборник трудов международной научной конференции (школы молодых ученых), посвященной Году научно-технического развития в Республике Татарстан. Казань; 2024: 128–30.
26. Водяницкий Ю.Н., Рогова О.Б., Пинский Д.Л. Применение уравнений Лэнгмюра и Дубинина – Радушкевича для описания поглощения меди и цинка дерново-карбонатной почвой. Почвоведение. 2000; 11: 1391–8.

REFERENCES

1. Geovani Rocha de Freitas, Meuris Gurgel Carlos da Silva, Melissa Gurgel Adeodato Vieira Biosorption technology for removal of toxic metals: a review of commercial biosorbents and patents. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019; 26(19): 19097–118. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05330-8>
2. Coelho P., Costa S., Silva S., Walter A. Metal(lloid) levels in biological matrices from human populations exposed to mining contamination – Panaqueira Mine (Portugal). *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A.* 2012; 75(13–15): 893–908.
3. Phan K., Phan S., Huoy L., Suy B., Wong M.H., Hashim J.H., Mohamed Yasin M.S., Aljunid S.M., Sthiannopkao S., Kim K.W. Assessing mixed trace elements in groundwater and their health risk of residents living in the Mekong River basin of Cambodia. *Environmental Pollution.* 2013; 183: 111–19.
4. Qu C.S., Ma Z.W., Yang J. Human Exposure Pathways of Heavy Metals in a Lead-Zinc Mining Area, Jiangsu Province. *China. PLoS One.* 2012; 7(11): e46793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046793>
5. Gernikova E.P., Lutseva A.I., Bokovikova TN., Mamashina E.A., Biglova Yu.R. Determination of adsorption activity of enterosorbents. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertiz sredstv meditsinskogo primeneniya.* 2013; 4: 47–50. <https://elibrary.ru/rwvvad> (in Russian)
6. Fatullayeva S., Tagiyev D., Zeynalov N. A review on enterosorbents and their application in clinical practice: Removal of toxic metals, Colloid and Interface Science Communications. 2021; 45: 100545. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100545> <https://elibrary.ru/zxg2f1>
7. Bondarev E.V., Shtrygol' S.Yu., Dyryavyj S.B. Use of enterosorbents in medical practice. *Prozivor. Elektronnyj resurs.* 2008; 13: 45–9. <https://vk.cc/cNS7n> (in Russian)
8. Palij I.G., Reznichenko I.G. A modern view on the problem of enterosorption: choosing the optimal drug. *Novosti mediciny i farmacii.* 2007; 11: 217. (in Russian)
9. Ursova N.I., Gorelov A.V. Modern view on the problem of enterosorption. Optimal approach to choosing a drug. *Rossijskij medicinskij zhurnal.* 2006; 19: 1391–6. (in Russian)
10. Shcherbakov P.L., Petukhov V.A. Comparative effectiveness of enterosorbents for diarrhea in children. *Voprosy sovremennoj pediatrii.* 2005; 4(4): 86–90. (in Russian)
11. Reshetnikov V.I. Evaluation of the adsorption capacity of enterosorbents and their dosage forms. *Khimiko-farmacevticheskij zhurnal.* 2003; 5(37): 28–32. (in Russian)
12. Nikolaev V.G., Mikhailovsky S.V., Gurina N.M. Modern enterosorbents and their mechanisms of action: a review. *Efferentnaya terapiya.* 2005; 4: 3–7. (in Russian)
13. Hotimchenko Yu.S., Ermak I.M., Bednyak A.E., Khasina Yel., Kropotov A.V., Kolenchenko E.A., Sergushchenko I.S., Khotimchenko M.Yu., Kovalev V.V. Pharmacology of non-starch polysaccharides. *Vestnik DVORAN.* 2005; 1: 72–82. (in Russian)
14. Avaliani S.L., Revich B.A., Zakharov V.M. Monitoring human health and environmental health. *Regional environmental policy [Monitoring zdrav'ya cheloveka i zdrav'ya sredy. Regional'naya e'kologicheskaya politika].* Moscow; Izd-vo centra ekhologicheskoy politiki Rossii; 2001. (in Russian)
15. Ustinova T.M., Vengerovich N.G., Chalykh S.N., Gusak T.I. Increasing the bioavailability of biotechnological and immunobiological drugs using chitosan microspheres (literature review). *Medline.ru.* 2022; 23: 217–29. (in Russian)
16. Fatullayeva S.S., Tagiyev D.B., Zeynalov N.A., Raucci M.G., Amendola E., D'Alala G.G., Gulyev A.D., Tagiyev S., Marcedula M.R., Demitri C., Gulyeva A.R., Suleymanova R.H. Synthesis and characterization of modified chitosan as a promising material for enterosorption of heavy metal ions. *Carbohydrate Research.* 2024; 545: 109255. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2024.109255>
17. Fomichev A.V., Sosyukin A.E., Maly'sheva E.V., Litvinov B.S., Lapina N.V., Pim-burski V.F., Chukarev A.E. The present and future use of enterosorbents in the prevention and treatment of adverse effects of heavy metal compounds. *Toksikologicheskiy vestnik.* 2020; 2: 41–6. (in Russian)
18. Sitsdikova F.G., Galyamova R.K. Results of the study of the clinical effectiveness of the enterosorber "Filtrum-STI" in acute intestinal infections in young children. In: *Collection of clinical studies of the drugs "Filtrum-STI" and "Laktofiltrum". Part II: Infectious diseases [Sbornik klinicheskix issledovanij preparatov "Fil'trum-STI" i "Laktofiltrum"]. Chast' II: Infekcionnye i zabolевaniya].* Moscow; 2006: 9. (in Russian)
19. Kasatkina M.A. Obtaining biologically active film materials based on chitosan modified with polyphosphate. *Khimiko-farmacevticheskij zhurnal.* 2016; 50(4): 32–9. (in Russian)
20. Babayan M.L. Effect of polysaccharides on intestinal metabolism: physiological aspects and possibilities of clinical application. *Lechashhij vrach.* 2011; 6: 92–5. (in Russian)
21. Panfilova V.N., Tarushenko T.E. Use of enterosorbents in clinical practice. *Pediatriccheskaya farmakologiya.* 2012; 9(6): 34–9. (in Russian)
22. Samokhin A.P., Kryshchenko B.C., Minkina T.M., Sshatovoj A.A. Adsorption isotherms of zinc, copper and lead by ordinary chernozem with monometallic and polymetallic pollution. *Tyazhelye i metally, radionuklidы i elementy-biofily v okruzhayushhej srede.* 2002; 1: 365–9. (in Russian)
23. Emelianov S.I., Briskin B.S., Demidov D.A., Demidova T.I. Possibilities of enterosorption and evolution of enterosorbents for the treatment of surgical endotoxicosis. *E'ksperimental'naya i klinicheskaya gastroenterologiya.* 2010; 11: 84–9 (in Russian).
24. Sekun D.M., Butylin Yu.P., Strelko V.V., Romashov O.A. Effect of enterosorbents with different surface chemistry on homeostasis. In: *Intravenous general anesthesia. Methods of detoxification. Abstracts of conference reports. [Vnutrivennaya obshaya anesteziya. Metody detoksikacii. Tezisy dokladov konferencij].* 1986: 156–9. (in Russian)
25. Tunakova Yu.A., Galimova A.R., Valley V.S., Shrom I.A. Evaluation of the sorption capacity of enterosorbents used to correct microelement imbalance in the body. In: *Chemistry and Engineering Ecology — XXIV. Collection of works of the international scientific conference (school of young scientists) dedicated to the Year of Scientific and Technological Development in the Republic of Tatarstan [Khimiya i inzhenernaya e'kologiya — XXIV. Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (shkoly' molodyyh uchenyih), posvyashchennoj Godu nauchno-tehnicheskogo razvitiya v Respublike Tatarstan].* Kazan; 2024: 128–30. (in Russian)
26. Vodyanickij Yu.N., Rogova O.B., Pinskij D.L. Application of Langmuir and Dubinin-Radushkevich equations to describe the absorption of copper and zinc by sodium carbonate soil. *Pochvovedenie.* 2000; 11: 1391–8. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Тунакова Юлия Алексеевна** – доктор хим. наук, профессор, заведующий кафедрой Общей химии и экологии, ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ», 420111, г. Казань, Россия. E-mail: juliaprof@mail.ru
- Галимова Алина Раисовна** – кандидат хим. наук, доцент кафедры Общей химии и экологии, ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ», 420111, г. Казань, Россия. E-mail: ARGalimova@kai.ru
- Валиев Всеволод Сергеевич** – старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии, ГБУ Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, 420089, г. Казань, Республика Татарстан. E-mail: podrost@mail.ru
- Файзуллин Рашат Искандарович** – кандидат мед. наук, доцент, заместитель директора по научной деятельности, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт фундаментальной медицины и биологии (ИФМиБ КФУ), 420055, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: RIFajzullin@kpfu.ru
- Шром Илья Александрович** – аспирант кафедры Общей химии и экологии, ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ», 420111, г. Казань, Россия. E-mail: shromilya@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Yulia A. Tunakova** – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of General Chemistry and Ecology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-8826-8639> E-mail: juliaprof@mail.ru
- Alina R. Galimova** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of General Chemistry and Ecology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-7535-1724> E-mail: ARGalimova@kai.ru
- Vsevolod S. Valiev** – Senior Researcher at the Biogeochemistry Laboratory, Institute of Ecology and Subsoil Use Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, 420089, Republic of Tatarstan, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-8848-5326> E-mail: podrost@mail.ru
- Rashat I. Faizullin** – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research, Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan, 420055, Republic of Tatarstan, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-6033-6356> E-mail: RIFajzullin@kpfu.ru
- Ilya A. Shrom** – Postgraduate Student of the Department of General Chemistry and Ecology, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation. E-mail: shromilya@yandex.ru