



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 536.7+541.64+226+546+701+66.094

Научная специальность ВАК – 1.4.1. Неорганическая химия

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13562>

**Особенности равновесной сорбции урана на волокнистом карбоксилированном сорбенте ФОРПАН из карбонатсодержащих растворов, моделирующих морскую воду**

М. А. Рагимли<sup>1</sup>, С. Р. Мамедова<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>Институт катализа и неорганической химии,  
пр. Г. Джавида, 113, Баку AZ-1143, Азербайджан

**Аннотация**

*Цель статьи:* Целью данной работы является исследование и выявление особенностей равновесной сорбции урана из карбонатсодержащих растворов на волокнистом сорбенте, полученным (в Санкт -Петербургском институте текстильной и легкой промышленности им. С. М. Кирова) путем синтеза карбоксилированного полиакрилонитрильного (ПАН) волокна формальдегидом, с условным названием ФОРПАН.

*Экспериментальная часть:* Изучена равновесная сорбция урана карбоксилированным волокнистым сорбентом ФОРПАН из карбонатсодержащих растворов, моделирующих морскую воду в интервале исходных концентрации ( $3.36 \cdot 10^{-5}$ – $7.13 \cdot 10^{-4}$  моль/л) и температур (293–338 К) при pH 7.85. Установлено, что в период контакта волокна с карбонатсодержащим раствором урана происходит резкое понижение pH раствора и расщепление трикарбонатуранилатного комплекса за счет протолиза карбоксильных групп. На основании математической обработки (методом наименьших квадратов) зависимостей равновесных коэффициентов распределения урана (мл/г) от равновесной концентрации урана в растворе (моль/мл) при различных температурах получено обобщенное уравнение, позволившее рассчитать ёмкость волокна по урану (моль/г) при сорбции его из модельных растворов, приготовленных на основе воды Каспийского моря в интервале исследуемых концентраций и температур, а также рассчитать ёмкость сорбента ФОРПАН относительно урана по воде Каспийского моря ( $1.22 \cdot 10^{-5}$  моль/г =  $2.9 \cdot 10^{-3}$  г/г) и коэффициент распределения урана по морской воде ( $1.6 \cdot 10^4$  мл/г) при  $T = 293.3$  К.

*Выводы:* На основании проведенных исследований особенностей равновесной сорбции урана из модельных карбонатсодержащих растворов и полученных результатов можно рекомендовать волокно ФОРПАН в целях извлечения урана из разбавленных карбонатсодержащих растворов природных вод, в частности, из воды Каспийского моря, с содержанием урана  $2.5 \cdot 10^{-6}$  моль/л, в интервале относительно низких температур 293–307 К.

**Ключевые слова:** сорбция, уран, волокнистый сорбент, карбонатсодержащие растворы, термодинамика

*Для цитирования:* Рагимли М. А., Мамедова С. Р. Особенности равновесной сорбции урана на волокнистом карбоксилированном сорбенте ФОРПАН из карбонатсодержащих растворов, моделирующих морскую воду. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(1): 103–114. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13562>

**For citation:** Rahimli M. A., Mamedova S. R. Features of equilibrium uranium sorption on the fibrous carboxylated sorbent FORPAN from carbonate-containing solutions simulating seawater. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(1): 103–114. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13562>

✉ Севиндж Рагим гызы Мамедова, e-mail: [edu.office@kqki.science.az](mailto:edu.office@kqki.science.az)

© Рагимли М. А., Мамедова С. Р., 2026



## 1. Введение

Океаническая (морская) вода – практически неисчерпаемый источник многих элементов и, в частности, урана, меди, кобальта, содержание которых в океане оценивается в  $4.2 \cdot 10^9$ ,  $4.1 \cdot 10^9$ ,  $7.6 \cdot 10^7$  тонн соответственно, перспективна не только своей неисчерпаемостью, но и своей технологичностью – постоянством состава и возможностью комплексного использования.

Внимание к океану, как сырьевому источнику урана, связано с истощением его земных запасов и интенсивным развитием ядерной энергетики. В связи с содержанием урана в морской воде в микроконцентрациях (~ 3 мкг/л) на фоне высокоминерализованного её сложного солевого состава необходимость подбора селективных сорбентов, с использованием высокоэффективных методов концентрирования этого элемента, представляет несомненный практический интерес [1, 2]. В настоящее время перспективными являются сорбционные методы [3].

До сих пор исследована возможность применения для этих целей многих типов сорбентов: природных и синтетических ионообменников, комплексообразующих, модифицированных, композиционных и других. Эффективность извлечения радионуклидов зависит от селективности сорбентов в присутствии неорганических и органических компонентов, содержащихся в водных средах [4–7].

При выборе сорбента необходимо учитывать: высокую сорбционную ёмкость и селективность; хорошие кинетические и механические свойства в многократных циклах сорбция – регенерация, а главное, дешевизну сорбента.

Большинству этих требований по многочисленным исследованиям отвечают сорбенты на основе оксидов металлов. В частности, как сорбент двуокись титана отличается радиационной и химической устойчивостью в кислых и щелочных растворах, а как ионообменник – удовлетворительной скоростью обмена, что важно при работе в колоночном варианте. В течение ряда лет достаточно детально исследовался гидратированный диоксид титана, как сорбент для извлечения урана из морской воды. Необходимо отметить, что наилучшими сорбционными характеристиками обладают смешанные титан оксидные сорбенты, за счёт внедрения в ходе синтеза инертной добавки в виде оксида циркония (6 %) и др., что оказывает существенное влияние на изменение сорбционных качеств диоксида титана (почти вдвое увеличивает его

кинетические и равновесные характеристики, значительно изменяя все энергетические параметры процесса сорбции [8–12]).

Для избирательного концентрирования радионуклидов из нейтральных природных вод применяются также комплексообразующие сорбенты с фосфорнокислыми, амидоксимными, гидроксамовыми, иминодиацетатными и другими группами, способные связать радионуклиды в соответствующие комплексные соединения и эффективно выделить их из природных вод с высоким содержанием солей и в присутствии природных лигандов [13].

В настоящее время сорбционное извлечение металлов из растворов волокнистыми сорбентами, характеризующимися хорошими кинетическими свойствами и высокими коэффициентами распределения элементов при сорбции, позволяет успешно применять их для концентрирования и разделения микроэлементов из природных вод и других растворов как в статических, так и в динамических условиях [14]. Развитая поверхность, обеспечивающая хорошие сорбционные и кинетические свойства волокнистых сорбентов, выгодно отличает их от гранульных сорбентов, т. к. они удобны для практического использования как в статических условиях (требуется небольшое количество сорбента, особенно, когда нет необходимости сорбент регенерировать), так и в динамическом, в колоночном варианте, для концентрирования микроэлементов из больших объёмов растворов, когда после сорбции обычно элементы элюируют и далее анализируют [15–16].

Нейтронно-активационным методом определение проводят непосредственно на сорбенте без элюирования или разрушения, что повышает экспрессность методов и уменьшает загрязнение посторонними примесями.

Подбором сорбента и условий сорбции обеспечивается отделение микроэлементов от больших количеств макрокомпонентов. Разделение элементов с помощью волокнистых сорбентов основано на различии в селективности сорбента к металлам, что в свою очередь обусловлено различием в устойчивости комплексов, образуемых металлами в фазе сорбента.

Селективность сорбента определяется прежде всего природой функционально-аналитических групп. Селективные свойства сорбентов характеризуют рядами селективности. Наличие карбоксильных групп обуславливает комплексообразующие свойства ионита. Ионы металлов

Zn, Cd, Pb, Cu, U и др. образуют с ацетат-ионами комплексы различной прочности. Так, например, прочность моноацетатных комплексов увеличивается в ряду:  $Zn^{2+} < Cd^{2+} < Pb^{2+} < Cu^{2+} < UO_2^{2+}$ . Примерно, по данным Грегора, в том же направлении растёт прочность полиакрилатных комплексов. Интересно, что прочность сульфаток комплексов указанных металлов практически одинакова.

Наглядной формой выражения селективности сорбента является зависимость коэффициентов распределения элементов от pH и концентрации компонента.

Наличие в ионообменных волокнах комплексобразующих группировок приводит к повышенному сродству этих ионитов к ионам металлов, такие соединения проявляют специфические свойства и обладают высокой селективностью к отдельным ионам металлов.

Наиболее эффективные сорбенты урана, известные к настоящему времени, содержат амидоксимные (АО) или имид-диоксимные ( $H_3JDO$ ) функциональные группы, способные связывать уранил-ионы ( $UO_2^{2+}$ ) – именно в этой форме уран чаще всего содержится в морской воде. К полиакрилонитрильным, (ПАН)-волокнам прививают  $H_3JDO$ -группу, избирательную к уранил-иону. Адсорбционная ёмкость таких модифицированных полимеров может превышать 4 г урана на один грамм адсорбента [17]. Использование функциональных АО-групп, хотя и значительно повысило эффективность извлечения урана и считается наиболее перспективным подходом для извлечения урана из морской воды, однако внедрение АО-групп является сложным и дорогостоящим процессом. Кроме того, на эффективность этих групп существенно влияет воздействие других ионов. Помимо этого, поскольку эти адсорбенты доступны в основном в виде порошков или наночастиц, их регенерация после извлечения урана является затруднительной.

Не все известные материалы, поглощающие уран, могут использоваться в промышленном извлечении урана из морской воды, т. к. они часто более прочно связываются с ионами ванадия ( $VO^{3+}$ ), содержание которых в воде превышает содержание урана [18], что очень затратно, потому что необходимо отделять уран от ванадия после сорбции.

Исследователи из национальной лаборатории ОК-Ридж и национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли под руководством А. Иванова и Джана Арнольда обратили внимание на сидерофоры – железопереносящие белки. Это

класс хелатообразующих соединений с азотными и кислородными донорными группами, используемые некоторыми видами бактерий и грибов как резервуары для секвестирования избытков железа, рассматриваются как потенциальные лиганды для связывания *f*-элементов, к которым относится уран [19]. Авторами синтезирована искусственная сидерофора – бис[гидрокси(метил)амино]-4мордолин1,3-триазин ( $H_2BHT$ ). Затем они модифицировали сополимер – этилен с акриловой кислотой, связав с ним этот лиганд. Несмотря на относительно низкую ёмкость материала – 0.1 г урана на 1 г сорбента, содержание ванадия на сорбцию урана не влияло, т. е.  $H_2BHT$  более избирателен к ионам урана, чем к ионам ванадия. В этом направлении ведутся дальнейшие работы [20–22].

Среди новейших достижений можно отметить работы авторов [23–25]. Учёными разработан ряд новых высокоселективных к урану пористых материалов с определёнными характеристиками порами и функциональными группами (гидроксильные, карбоксильные, амидоксимные, фосфатные и т. д.). Активные группы, координируясь в этих пористых материалах, образуют специфические участки для связывания урана, которые в сравнении с другими ионами обладают более высоким сродством и селективностью к ионам уранила ( $UO_2^{2+}$ ).

Наряду с исследованиями свойств традиционных сорбентов изучаются адсорбционно-фотокаталитические и адсорбционно-электрокаталитические материалы, содержащие в своих каркасах как специфические адсорбционные участки, так и фотокаталитические или электрокаталитические фрагменты. Эти инновационные стратегии позволяют преобразовать ионы уранила в сорбируемые твёрдые продукты (такие, как  $UO_2$  или  $Na_2O(UO_3 \cdot H_2O)$ ), что повышает высокоэффективное извлечение урана, а также устойчивость их к биообрастанию. Разработка таких пористых материалов является прорывом в области селективного извлечения урана из морской воды [23].

Поскольку эффективность извлечения урана зависит от наличия активных адсорбционных участков в адсорбентах, то для улучшения сорбционной способности необходима максимизация коэффициента использования связующих участков. С этой целью в сорбент (содержащий, как амидоксимные, так и карбоксильные группы) внедряют микроредокс реакторы, функционирующие по принципу конверсии  $Cu(\varepsilon) \rightarrow Cu(\varepsilon\varepsilon)$ ,

что активирует регенерацию инактивированных связывающих участков. Такой сорбент обладает высокой адсорбционной способностью 962.4 мг-U/гAds, превосходной способностью противостоять обрастанию, а также отличным поглощением урана (14.62 мг-U/гAds) из естественной морской воды за 56 дней. Эти показатели дают возможность считать сорбент лучшим среди высокопроизводительных материалов для сорбции урана из морской воды [24].

Синтезирован эффективный сорбент для извлечения урана из морской воды введением на поверхность  $Ti_3C_2$  амидоксимных групп (АО) и привитых полиамидов (РА) простым одностадийным гидротермальным методом. Поглощение  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$  сорбентом ( $Ti_3C_2$ -АО-РА) характеризует быструю кинетику реакции (около 120 мин), блестящую сорбционную способность (81.1 мг/г при pH 8.3), значительную высокую селективность (32.8 мг U/гAds) и превосходные антибактериальные характеристики загрязнения (92.8 %).

Спектры рентгеновского поглощения (XPS) и вычислительные исследования теории функционала плотности (DFT) также показали высокую экстракционную способность  $Ti_3C_2$ -АО-РА относительно урана, в основном, за счёт комплексообразования АО и  $NH_2$  с  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ . Эти выводы дают основание считать сорбент  $Ti_3C_2$ -АО-РА перспективным для быстрой и селективной адсорбции урана из реальной морской воды [25].

Полученные новейшие достижения учёных показывают, что извлечение урана из морской воды является перспективным подходом для обеспечения непрерывной поставки уранового топлива в ядерную энергетику.

Проблема создания работоспособных неорганических и волокнистых сорбционных материалов, обладающих достаточной механической прочностью, приемлемой кинетикой с высокой сорбционной ёмкостью остаётся актуальной. Применение же сорбционных материалов сдерживается отсутствием широкого их ассортимента, а также вследствие недостаточной изученности вопросов, связанных с термодинамикой, кинетикой и механизмом сорбции.

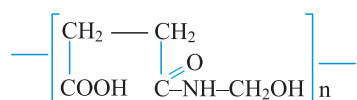
Целью данной работы является исследование особенностей равновесной сорбции урана волокнистым сорбентом ФОРПАН (синтезированным в Санкт-Петербургском институте текстильной и лёгкой промышленности им. С. М. Кирова) из карбонатсодержащих растворов, моделирующих морскую воду в широком интервале концентраций ( $3.36 \cdot 10^{-5} \div 7.13 \cdot 10^{-4}$  моль/л) и тем-

ператур (293–338 К), и расчет обобщенного уравнения термодинамики сорбции урана исследуемым волокном ФОРПАН при заданных условиях.

## 2. Экспериментальная часть

Исследования проводили на модельных растворах, приготовленных на основе натуральной морской воды Каспийского моря (с содержанием урана  $2.5 \cdot 10^{-6}$  моль/л), в которую для целей аналитического контроля и удобства проведения эксперимента вводили уран-233 в качестве радиоактивного индикатора, предварительно очищенный от продуктов распада, а также различные количества природного урана в виде трикарбонат-уранилатного комплекса для исследования сорбции в широких интервалах температур (293–338 К) и концентраций ( $3.36 \cdot 10^{-5} \div 7.13 \cdot 10^{-4}$  моль/л). Основным требованием к модельным растворам является стабильность концентрации и форм существования урана в условиях карбонат-бикарбонатного равновесия. Методика [26, 27] приготовления растворов с последующей стабилизацией pH при барботировании воздуха через растворы и с корректировкой pH с помощью 0.01 М растворов HCl и  $Na_2CO_3$  позволила получить стабильные (не менее двух лет) растворы по концентрации урана и pH. Выбранные pH растворов (~ 7.85) соответствовали измерениям pH морской воды. Уран в модельных растворах, как и в морской воде, находился в ионно-растворимой форме  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ . При определении содержания урана в растворах и образцах сорбентов использовались методы радиоактивных индикаторов, а также спектрофотометрический с реагентом Арсеназо-III. Контроль за измерением  $\alpha$ -радиоактивности осуществляли с использованием прибора 2154-1-1М «ПРОТОКА».

Кинетику сорбции урана проводили ранее [1] по методу ограниченного объема на волокнистом сорбенте ФОРПАН со структурной формулой звена:



Эксперименты осуществлялись на установке, представляющей собой стеклянный реакционный сосуд, снабженный электромешалкой и термостатом. Через определенные промежутки времени, при заданной температуре (293, 308, 323 или 338 К) раствора в сосуд вводили 10 мл раствора урана, определённой концентрации, а

также 0.01 г воздушно-сухого волокна, одновременно фиксировалось время начала опыта. Через определённые промежутки времени из реакционного сосуда отбирали пробы раствора (по 0.025 мл) и анализировали на содержание урана  $\alpha$ -радиометрическим методом.

На основании исходной концентрации урана в растворе в каждый момент времени рассчитывали концентрацию урана в растворе в заданное время  $\tau$  ( $C_{p,\tau}$ ), количество сорбированного урана в твёрдой фазе ( $C_{T,\tau}$ ) и величину коэффициента распределения урана в системе в заданное время ( $Kd, \tau$ ) по формулам:

$$C_{p,\tau} = C_{p,исх} \frac{J_{p,t}}{J_{p,исх}}, \tag{1}$$

$$C_{T,\tau} = \frac{C_{p,исх} \cdot V}{m} \left( 1 - \frac{J_{p,\tau}}{J_{p,исх}} \right), \tag{2}$$

$$Kd, \tau = \frac{V}{m} \left( \frac{J_{p,исх}}{J_{p,\tau}} - 1 \right), \tag{3}$$

где  $J_{p,исх}$  и  $J_{p,\tau}$  – исходная и определённая по истечении заданного времени  $\alpha$ -радиоактивность раствора, имп;  $C_{p,исх}$  и  $C_{p,\tau}$  – исходная концентрация урана и концентрация в заданное время в растворе, моль/л;  $V$  – объём раствора, мл;  $m$  – масса сорбента, г.

Все кинетические зависимости удовлетворительно описывались обобщённым кинетическим уравнением Авраами–Ерофеева–Колмогорова с использованием соотношения Саковича [1]. Обработку параметров уравнения производили методом наименьших квадратов.

Важную информацию о процессах сорбции можно получить при исследовании термодинамики сорбции заданного вещества на основании

температурных зависимостей равновесных коэффициентов распределения или изотерм сорбции при различных температурах. На основании экспериментальных данных сорбция урана волокном ФОРПАН от времени, при достижении равновесия «сверху» и «снизу» за время  $1.4 \cdot 10^4$  с изменялась незначительно, что позволило считать представленные коэффициенты распределения ( $K_d$ ) в табл. 1 равновесными, а величины  $C_p$  и  $C_T$ , принимали за равновесные и обозначали соответственно  $C_{p,\infty}$  и  $C_{m,\infty}$ .

Ниже на рис. 1, на основании экспериментальных результатов табл. 1 приведены зависимости равновесных коэффициентов распределения урана ( $K_{d,\infty}$ , мл/г) от равновесной концентрации урана в растворе ( $C_{p,\infty}$ , моль/мл) при различных температурах. Экстраполируя эти зависимости до любых заданных равновесных концентраций урана в растворе, можно получить для каждой из них уравнение вида:

$$\ln K_{d,\infty} = a + b \ln C_{p,\infty}, \tag{4}$$

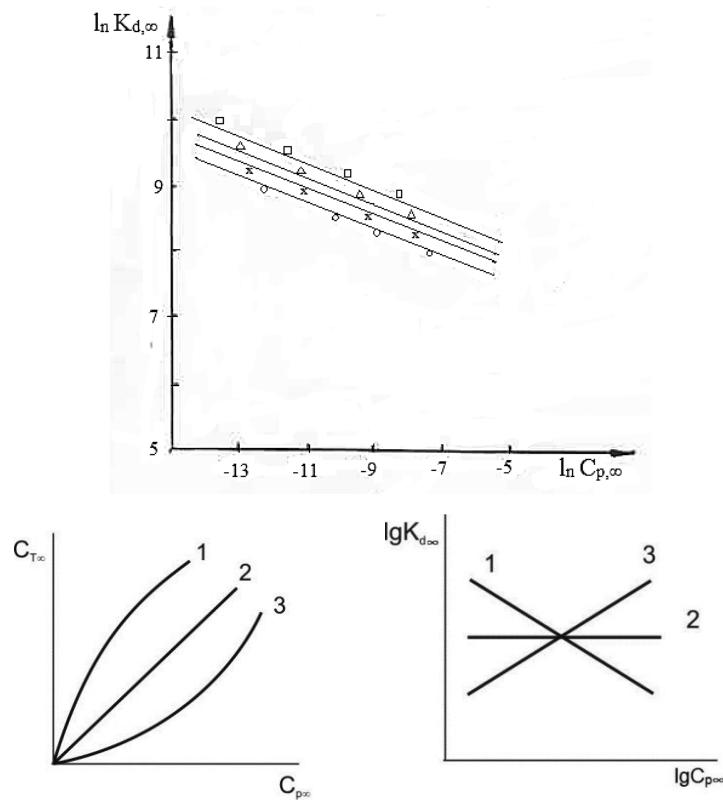
где  $K_{d,\infty}$  – равновесный коэффициент распределения урана в системе, мл/г, параметры  $a$  и  $b$  – постоянные величины для данного значения pH исходного раствора, рассчитанные математической обработкой методом наименьших квадратов (приведены в табл. 2).

Уран в морской воде находится в растворённом состоянии в виде устойчивого трикарбонат-уранилатного комплекса при pH > 7.5, с содержанием карбонат-ионов больше, чем  $n \cdot 10^{-6}$  М. При содержании карбонат-иона меньше  $n \cdot 10^{-6}$  М и pH < 7.5 он диссоциирует за счёт образования в растворе высоких концентраций бикарбонат-ионов не взаимодействующих с ураном.

Определение содержания  $\text{HCO}_3^-$  групп проводили по методике Резникова, модифицирован-

**Таблица. 1.** Сорбция  $\text{U}^{255}$  из модельных растворов с  $C_{p,исх} = (3.36 \cdot 10^{-5} - 7.13 \cdot 10^{-4})$  моль/л полиамфолином

Сорбент, структурная формула звена, активные группы	Краткая характеристика сорбента, СОЕ, ммоль/г	Исходная концентрация раствора, $C_{p,исх}$ , моль/л	Равновесный коэффициент распределения $K_{d,\infty}$ , мл/г				Равновесное время, $t_{\infty,C}$
			Температура, К				
			293	308	232	338	
$\begin{array}{c} \text{ФОРПАН} \\ \text{O} \\ \parallel \\ \text{COOH}-\text{C}- \\   \\ \text{NHCH}_2\text{OH} \\ \text{O} \\ \parallel \\ \text{COOH}, \text{C}-\text{NH} \end{array}$	Получен синтезом карбоксилированного ПАН-волокна формальдегидом, $\text{СОЕ}_{\text{NaOH}} = 2.0$	$3.36 \cdot 10^{-5}$	6670	11195	21764	32260	$1.4 \cdot 10^4$
		$1.15 \cdot 10^{-4}$	4496	7336	13068	16224	
		$2.7 \cdot 10^{-4}$	2165	3544	4124	8773	
		$7.13 \cdot 10^{-4}$	1232	1881	2342	3149	



**Рис. 1.** Изотерма сорбции урана в виде зависимости равновесных коэффициентов распределения ( $K_{d,\infty}$ ) мл/г от равновесной концентрации урана в растворе ( $C_{p,\infty}$ , моль/л) волокном ФОРПАН; 1 – 293 К; 2 – 308 К; 3 – 323 К; 4 – 338 К

**Таблица 2.** Параметры уравнения  $\ln K_{d,\infty} = a + b \ln C_{p,\infty}$  (4) для четырех концентраций при заданной температуре. Значения ёмкостей (моль/г), рассчитанные с обобщёнными параметрами уравнения (6)

Волокно	T, К	$\ln K_{d,\infty}$ , мл/г	$\ln C_{p,\infty}$ , моль/л	рН $C_{p,\infty}$	Параметры уравнения (4)		Значение ёмкости по уравнению (6)	
					a	b	$\ln C_{B,\infty}$	моль/г
ФОРПАН	293	8.79	-12.13	5.1	3.72	-0.42	-10.87	$1.9 \cdot 10^{-5}$
		8.4	-10.77	7.22			-10.07	$4.2 \cdot 10^{-5}$
		7.68	-9.36	7.32			-9.25	$9.6 \cdot 10^{-5}$
		7.12	-8.05	7.42			-8.49	$2.1 \cdot 10^{-4}$
	308	9.3	-12.8	5	4.14	-0.41	-11.14	$1.45 \cdot 10^{-5}$
		8.97	-11.19	7.7			-10.23	$3.2 \cdot 10^{-5}$
		8.17	-9.95	7.8			-9.52	$7.3 \cdot 10^{-5}$
		7.54	-8.31	8.22			-8.60	$1.8 \cdot 10^{-4}$
	323	9.99	-13.43	5.1	3.64	-0.47	-11.38	$1.1 \cdot 10^{-5}$
		9.48	-11.71	7.7			-10.43	$2.9 \cdot 10^{-5}$
		8.34	-10.75	7.45			-9.90	$4.2 \cdot 10^{-5}$
		7.76	-8.45	7.85			-8.60	$1.8 \cdot 10^{-4}$
	338	10.38	-13.80	4.9	4.03	-0.45	-11.47	$1.0 \cdot 10^{-5}$
		9.69	-9.77	7.3			-9.29	$91 \cdot 10^{-5}$
		9.08	-8.48	7.7			-8.59	$1.8 \cdot 10^{-4}$
		8.05	-8.79	8.32			-8.44	$2.1 \cdot 10^{-4}$

Средние значения параметров  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$  уравнения (4)  $a = (3.88 \pm 0.3)$ ;  $b = -0.43 \pm 0.038$

ной для условий нашего эксперимента [28], результаты которого представлены в табл. 3.

Расчет величин энтропии и энтальпии процесса сорбции урана на исследуемом волокне ФОРПАН проводили из экспериментальных результатов зависимости равновесного коэффициента распределения урана от температуры. Такие зависимости были получены для различных исходных концентраций урана в растворах с pH 7.85 и представлены на рис. 2.

### 3. Результаты и обсуждение

Представленная на рис. 1 зависимость  $\ln K_{d,\infty} \rightarrow \ln C_{p,\infty}$  – это аналогично [29] принятое представление изотермы вида  $C_{T,\infty} \rightarrow C_{p,\infty}$ , которая может с успехом заменена представлением в логарифмических координатах, позволившим легко, с помощью экстраполяции, оценивать ёмкость сорбента при любой равновесной

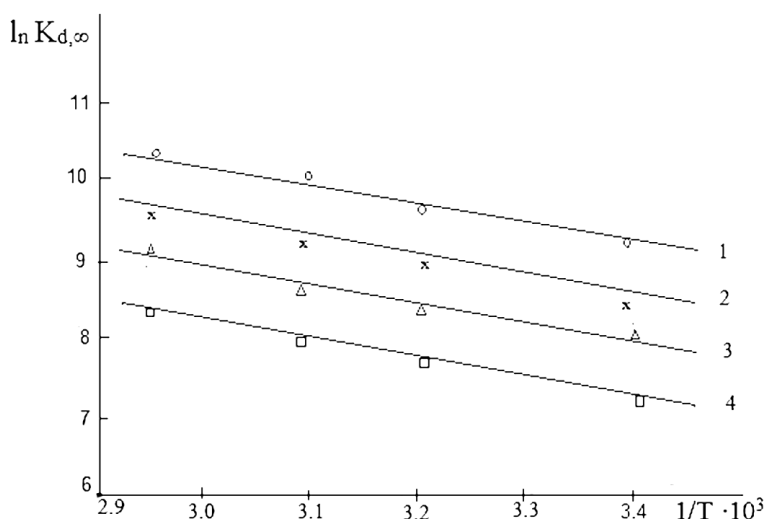
концентрации элемента в растворе для любой формы изотермы сорбции.

Рассчитанные значения параметров изотермы сорбции урана из модельных растворов представлены в табл. 2.

Дальнейшей математической обработкой значений параметров  $a$  и  $b$  уравнения (4) от температуры ( $a \rightarrow \frac{1}{T}$  и  $b \rightarrow \frac{1}{T}$ ) выведено обобщённое уравнение, позволившее рассчитать равновесный коэффициент распределения  $K_d$  (мл/г), связанный с температурой и равновесной концентрацией раствора (моль/л), а также ёмкость волокна по урану (моль/г) при его сорбции из модельных растворов морской воды с pH 7.85–7.9 в широком интервале равновесных концентраций урана в растворе ( $1.0 \cdot 10^{-4}$ – $1.0 \cdot 10^{-9}$  моль/л) и температур (293–338 К):

**Таблица 3.** Сорбция урана из модельных карбонатсодержащих растворов на волокне ФОРПАН при  $T = 293.15$  К. Результаты определения содержания бикарбонат-ионов и урана в растворах и сорбентах

Исходная концентрация урана в растворах моль/л	$3.36 \cdot 10^{-5}$	$1.15 \cdot 10^{-4}$	$7.13 \cdot 10^{-4}$
pH исходного раствора	7.85	7.87	7.89
Концентрация урана в равновесном растворе после сорбции, моль/л	$4.4 \cdot 10^{-6}$	$2.09 \cdot 10^{-5}$	$3.21 \cdot 10^{-4}$
Концентрация урана в сорбенте, моль/г	$2.92 \cdot 10^{-5}$	$9.41 \cdot 10^{-5}$	$3.95 \cdot 10^{-4}$
pH равновесного раствора	5.1	7.2	7.38
Концентрация иона $\text{HCO}_3^-$ в исходном растворе, моль/л	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$5.25 \cdot 10^{-3}$	$3.01 \cdot 10^{-2}$
Концентрация иона $\text{HCO}_3^-$ в растворе после сорбции, моль/л	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$6.41 \cdot 10^{-3}$	$4.16 \cdot 10^{-2}$



**Рис. 2.** Температурные зависимости равновесного коэффициента распределения сорбции урана волокном ФОРПАН при различной исходной концентрации урана в растворе: 1 –  $3.36 \cdot 10^{-5}$  М; 2 –  $1.15 \cdot 10^{-4}$  М; 3 –  $2.73 \cdot 10^{-4}$  М; 4 –  $7.14 \cdot 10^{-4}$  М

$$\ln K_d = (5,271 - 0,72 \ln C_{p,\infty}) - (437,68 - 89,52 \ln C_{p,\infty}) / T. \quad (5)$$

На основании уравнения (5) можно записать:

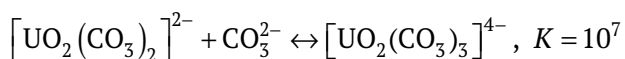
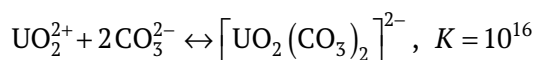
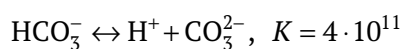
$$\ln C_{T,\infty} = (-5,271 + 0,28 \ln C_{p,\infty}) + (437,68 + 89,52 \ln C_{p,\infty}) / T. \quad (6)$$

Подставив в уравнение (6) значение концентрации урана по воде Каспийского моря  $2.5 \cdot 10^{-6}$  моль/л, в виде  $\ln C_{p,M.B} = -12.89$  получим значение емкости по морской воде ( $C_{T,M.B}$ ):

$$\ln C_{T,M.B} = -11,31;$$

$$C_{T,M.B} = 1,22 \cdot 10^{-5} \text{ моль / г} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ г / г} \quad (7)$$

Сорбция урана из природных вод и карбонатных систем активно протекает как с участием анионитов, так и катионитов. Однако в одних и тех же условиях поглощение урана катионитами объясняется авторами [30] тем, что присутствие ионообменника смещает равновесия между карбонатным комплексом и продуктами гидролиза уранил-иона. Необходимо считаться с участием иона  $\text{HCO}_3^-$  в системе карбонатных равновесии, взаимосвязанных с pH раствора и определяющих связывание урана в уранилкарбонатные комплексы по реакциям:



Из сопоставления констант равновесия указанных реакций видно, что в области близких к нейтральным и щелочным значениям pH уже небольшого избытка карбонатов сверх стехиометрического оказываются достаточным для практически полного связывания урана в уранилкарбонатные анионы [31].

Карбоксильные группы волокна ФОРПАН, являясь группой кислотной природы, подчиняясь механизму диссоциации карбоксильных катионов [32], в зависимости от pH раствора частично или полностью диссоциируют и ответственны за сорбцию урана в результате ионного обмена. Группами основной природы являются аминогруппы, которые ответственны за образование координационной связи при сорбции в слабокислой среде с pH 3–5. Учитывая это, появление отрицательного заряда в щелочных

средах и положительного в кислых для волокна ФОРПАН можно представить следующими уравнениями реакции:



В начальный момент контакта волокна с карбонатсодержащим раствором с pH 7.85 волокно заряжается отрицательно за счёт протолиза карбоксильной группы по реакции (а), при этом происходит понижение pH раствора и расщепление трикарбонатуранилатного комплекса. В этом случае проявляется ионообменная активность  $\text{COOH}^-$ -групп, а также в растворах с нейтральными и слабощелочными pH возможно образование устойчивых карбоксильных комплексов урана. В более кислых средах карбоксильные группы протонируются и не способны образовывать прочные связи с ураном, в то время, как в щелочной среде уран может образовывать сложные комплексные соединения, включая гидроксидные комплексы  $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ ,  $\text{UO}_2(\text{OH})_3$ , способные конкурировать с карбоксильными. В результате смещения pH-среды в область низких значений pH (~ 5–5.5) процесс начинает протекать по реакции (б), в ходе которой происходит реализация двух типов связи лигандных групп волокна (ионной и координационной), т. к. в кислой среде аминогруппа протонирует и приобретает положительный заряд, превращаясь в ион аммония ( $-\text{NH}_3^+$ ), способный участвовать в комплексобразовании, однако в щелочной среде она теряет протон и становится нейтральной, что тормозит дальнейшему процессу комплексобразования, или возможно происходит десорбция комплекса, что отражается на смещении равновесия между формами существования урана в присутствии волокна [33].

Из полученных экспериментальных данных следует, что в период контакта раствора с депротонизированным волокном из слабо щелочных и кислых растворов сорбция характеризуется высокими коэффициентами распределения (табл. 1), что можно отнести за счёт увеличения в растворе  $\text{HCO}_3^-$ . Отмеченное увеличение концентрации и pH растворов, а также понижение сорбции урана (выход на равновесие), подтверждает отсутствие корреляции между ураном и карбонат-ионами в волокне. С повышением концентрации уране и pH раствора процесс протекает с увеличением ионообменного механизма.

Аналогичное явление в процессе сорбции обнаружено и в работе [34] при исследовании сорбции урана (VI) на гетите спектрами рентгеновского поглощения (EXAFS), когда в присутствии карбонат-ионов в растворе обнаружено усиление сорбции урана при низком pH с образованием комплексов:  $(> \text{FeOH})_2 \text{UO}_2(\text{H}_2\text{O})$ ;  $\text{FeOCO}_2\text{UO}_2$  и  $(> \text{FeOH})_2 \text{UO}_2\text{CO}_3$ , которые десорбировались при повышении pH раствора и не фиксировались спектрами EXAFS. С учетом этих комплексов авторами разработана термодинамическая модель поверхностного комплексообразования на гетите, отвечающая полученным их экспериментальным данным по сорбции урана из водных растворов.

Для исследования термодинамики процесса сорбции урана из карбонатсодержащих растворов, моделирующих морскую воду, вначале обрабатывали уравнение:

$$\ln K_d = A - B \frac{1}{T} \quad (8)$$

методом наименьших квадратов для различных исходных концентраций ( $3.36 \cdot 10^{-5} \div 7.13 \cdot 10^{-4}$  моль/л) в виде зависимости  $\ln K_d - \frac{1}{T}$  от каждой

температуры (293, 308, 323, 338 К). Дальнейшей обработкой параметров  $A$  и  $B$  от исходной концентрации в виде  $(A - \ln C_{p,\text{исх}})$  и  $(B - \ln C_{p,\text{исх}})$ , где  $A = A' + B'$  [ $A = (-1.17) + (-2.17)$ ] и  $B = A'' + B''$  [ $B = 1276.7 + 472$ ], получены обобщенные значения параметров для любой исходной концентрации:

$$A = A' + A'' \ln C_{p,\text{исх}}, \quad (9)$$

$$B = B' + B'' \ln C_{p,\text{исх}}. \quad (10)$$

В результате математической обработки всей совокупности полученных зависимостей было выведено обобщенное полуэмпирическое термодинамическое уравнение, связывающее равновесный коэффициент распределения урана в системе ( $K_{d,\infty}$ ), исходную концентрацию и температуру проведения сорбционного эксперимента в виде:

$$\ln K_d = A' + A'' \ln C_{p,\text{исх}} - \frac{B' + B'' \ln C_{p,\text{исх}}}{T} \quad (11)$$

Подставив в уравнение (11), рассчитанные значения параметров:  $A' + A'' \ln C_{p,\text{исх}} = (-1.17) + (-1276.7) \ln C_{p,\text{исх}}$  и  $B' + B'' \ln C_{p,\text{исх}} = (2.17) + 472 \ln C_{p,\text{исх}}$ , получено обобщенное уравнение термодинамики процес-

са сорбции урана из модельных растворов морской воды в широком интервале исходных концентраций урана ( $3.36 \cdot 10^{-5} - 7.13 \cdot 10^{-4}$  моль/л) и температур (293–338 К) при pH 7.85 для волокна ФОРПАН:

$$\ln K_d = (-1.17) + (-1276.7 \cdot \ln C_{p,\text{исх}}) - (2.17 + 472 \cdot \ln C_{p,\text{исх}}) / T. \quad (12)$$

Значение коэффициента распределения урана по воде Каспийского моря, ( $K_{dM.B}$ ) с концентрацией  $2.5 \cdot 10^{-6}$  моль/л ( $\ln C_{p,M.B} = -12.89$ ), при  $T = 293.3$  К, рассчитанное по уравнению (12), равно  $\ln K_{dM.B} = 9.7$ ;  $K_{dM.B} = 1.6 \cdot 10^4$  мл/г.

Значения параметров  $A = A' + A'' \ln C_{p,\text{исх}}$ ;  $B = B' + B'' \ln C_{p,\text{исх}}$ , уравнения (12), соответствуют параметрам известного соотношения:

$$\ln K_d = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}, \quad (13)$$

где  $K_d$  – равновесный коэффициент распределения урана в системе, мл/г;  $\Delta S$  – энтропия реакции сорбции урана, Дж/моль·град;  $\Delta H$  – энтальпия реакции сорбции урана, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8.3143 Дж/моль·град;  $T$  – температура эксперимента, К.

Для расчёта изменения свободной энергии Гиббса была использована формула:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S. \quad (14)$$

Как следует из табл. 4, значение энтальпии  $\Delta H < 0$ , отрицательное, т. е. процесс экзотермический, с выделением тепла. Теплота реакции сорбции урана исследуемым волокном оценивается величинами в интервале  $-28 \div -40$  кДж/моль. Эти величины значительно ниже теплоты хемосорбционных реакций  $50 \div 80$  кДж/моль и близки к энтальпиям, характерным для ионообменных реакций, т. е. процесс сорбции урана из карбонатсодержащих растворов волокном ФОРПАН протекает по механизму ионного обмена, наряду с которым имеет место и комплексообразование.

#### 4. Выводы

На основании исследования основных закономерностей равновесной сорбции урана исследуемым волокном установлено, что экспериментально определенные коэффициенты распределения урана в интервале температур 293–338 К являются равновесными. Установлено, что в период контакта волокна с карбонатсодержащим раствором урана происходит резкое понижение pH 7.86 раствора и расщепление трикарбонату-

**Таблица 4.** Параметры уравнения (8) для различных исходных концентраций модельных растворов и значения величин энтальпии, энтропии и свободной энергии Гиббса реакции сорбции урана на волокне ФОРПАН ( $T = 298.16$  К), рассчитанные на основе обобщенных параметров  $A = A' + A'' \ln C_{p,исх}$ ;  $B = B' + B'' \ln C_{p,исх}$

$C_{p,исх}$ mol/l	$\ln C_{p,исх}$	$A =$		$B =$		$\Delta S$ Дж/моль·град	$\Delta H$ Дж/моль	$\Delta G$ кДж/моль
		$A' + B' \ln C_{p,исх}$	$A'' + B'' \ln C_{p,исх}$	$A' + A'' \ln C_{p,исх}$	$B' + B'' \ln C_{p,исх}$			
$3.36 \cdot 10^{-5}$	-10.3	20.907	-3584	13148	-4859	109.32	-40400	-72.998
$1.15 \cdot 10^{-4}$	-9.1	18.609	-2887	11610	-4293	96.535	-35694	-64.477
$2.73 \cdot 10^{-4}$	-8.2	17.350	-2843	10462	-3868	87.015	-32162	-58.1
$7.13 \cdot 10^{-4}$	-7.2	14.009	-2013	9237	-3415	76.801	-28394	-51.292

ранилатного комплекса за счет протолиза карбоксильных групп. Этот период характеризуется высокими коэффициентами распределения урана и с увеличением в растворе  $\text{HCO}_3^-$ , что подтверждает отсутствие корреляции между ураном и карбонат-ионами в волокне.

Рассчитана ёмкость волокна по урану (моль/г) при сорбции его из модельных растворов, приготовленных на основе воды Каспийского моря в интервале исследуемых концентраций и температур, а также рассчитана ёмкость сорбента ФОРПАН относительно урана по воде Каспийского моря ( $1.22 \cdot 10^{-5}$  моль/г =  $2.9 \cdot 10^{-3}$  г/г) и  $K_{дм,В} = 1.6 \cdot 10^4$  мл/г при  $T = 293.3$  К.

Получено обобщённое полуэмпирическое термодинамическое уравнение сорбции урана исследуемым волокном, связывающее равновесный коэффициент распределения урана в системе, исходную концентрацию и температуру проведения сорбционного эксперимента при заданных условиях, параметры которого позволили рассчитать энтропию, энтальпию и энергию Гиббса процесса сорбции урана волокном ФОРПАН. При этом значения энтальпии ( $\Delta H < 0$ ) отрицательные, т. е. процесс экзотермический, протекает с выделением тепла. Теплота реакции сорбции урана исследуемым волокном оценивается величинами в интервале  $-28 \div -40$  кДж/моль, значения которых оказались значительно ниже хемосорбционных процессов, т. е. более соответствуют ионообменным, наряду с которыми протекает и комплексобразование.

На основании проведенных исследований особенностей равновесной сорбции урана из модельных карбонатсодержащих растворов и полученных результатов можно рекомендовать волокно ФОРПАН в целях извлечения урана из разбавленных карбонатсодержащих растворов природных вод, в частности, из воды Каспийского моря, с содержанием урана  $2.5 \cdot 10^{-6}$  моль/л, в интервале относительно низких температур

$20 \div 35$  °С.

### Заявленный вклад авторов

Рагимли М. А. – идея, написание статьи, научное редактирование текста; Мамедова С. Р. – поиск и участие в анализе литературных данных, в составлении рисунков и таблиц.

### Конфликт интересов

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

### Список литературы

1. Рагимли М. А., Нуриев А. Н. Сорбция урана из карбонатсодержащих растворов карбоксилированным волокнистым сорбентом. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013;15(4): 436–443. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20931239>
2. Wang F., Liu Q., Li R., ... Wang J. Selective adsorption of uranium (VI) onto prismatic sulfides from aqueous solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2016;490: 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.11.045>
3. Перлова О. В., Текменжи Е. И., Перлова Н. А., Поликарпов А. П., Извлечение и концентрирование соединений урана (VI) из нитратных растворов волокнистыми ионитами ФИБАН в динамических условиях. *Вопросы химии и химической технологии*. 2019;5:104–111. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-126-5-104-111>
4. Zidan W. I., Abo-Aly M. M., Elhefnawy O. A., Bakier E. Batch and column studies on uranium adsorption by Amberlite XAD-4 modified with nano-manganese dioxide. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015;304(2): 645–653. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3833-3>
5. Dzyazko Yu. S., Perlova O. V., Perlova N. A., ... Palchik A. V. Composite cation-exchange resins containing zirconium hydrophosphate for purification of water from U (VI) cations. *Desalination and Water Treatment* 2017;69: 142–152. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.0686>
6. Perlova O., Dzyazko Y., Halutska I., Perlova N., Palchik A. Anion exchange resin modified with nanoparticles of hydrated zirconium dioxide for sorption of soluble U (VI) compounds. *Springer Proceedings in Physics* 2018;210: 3–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91083-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91083-3_1)

7. Soldatov V. S., Zelenkovskii V. M., Orlovskaya L. A. Sorption of bivalent ions by a fibrous chelating ion exchanger and the structure of sorption complexes. *Reactive and Functional Polymers*. 2011;71(1): 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2010.11.003>
8. Мясоедов Б. Ф., Нуриев А. Н., Новиков Ю. П., ... Малых Т. Г. Исследование по сорбции урана из карбонат-содержащих растворов неорганическими сорбентами. VII. Термодинамика сорбции урана на титансодержащих сорбентах с разупорядоченной структурой. *Радиохимия*, 1984;26(3): 285–288.
9. Нуриев А. Н., Акперов Г. А., Мамедов Р. М., Джаббаров З. А., Рагимли М. А., Эфендиева Ш. З. Исследование сорбции урана из карбонатсодержащих растворов неорганическими сорбентами. Кинетика и термодинамика сорбции урана на титан-олово и титан-марганец-содержащих сорбентах. *Радиохимия*, 1998;40: 256–258.
10. Нуриев А. Н., Рагимли М. А. Влияние механической обработки на структуру и сорбционные свойства титан-цирконий содержащего сорбента при сорбции урана из моделирующих состав морской воды растворов. *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2017;19(13): 400–407. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2017.19/217>
11. Смирнова В. В. Влияние структуры, свойств и обработки поверхности на сорбционную активность диоксида титана. *Современные проблемы науки и образования*. 2012; 5: 1–7. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18318988>
12. Смирнова В. В., Ильин А. П. Влияние постоянного электрического поля на сорбционные свойства диоксида титана. *Фундаментальные исследования* 2013;6-6: 1366–1371. Режим доступа: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31742>
13. Мясоедова Г. В., Никашина В. А. Сорбционные материалы для извлечения радионуклидов из водных сред. *Российский химический журнал им. Д. И. Менделеева*. 2006;1(5): 55. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9316663>
14. Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. Fibrous ion exchangers. In: *Ion exchange technology I: theory and materials*. Inamuddin and M. Luqman (eds.). Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer Science business Media. 2012. 199–271. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8_9)
15. Перлова О. В., Сазонова В. Ф., Перлова Н. А., Поликарпов А. П. Сорбция соединений урана (VI) волокнистым катионитом ФИБАН К-1 из кислых сред. *Вода: химия и экология* 2016;3: 53–59. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26696988>
16. Sazonova V. F., Perlova O. V., Perlova N. A., Polikarpov A. P. Sorption of uranium (VI) compounds on fibrous anion exchanger surface from aqueous solutions. *Colloid Journal*. 2017;79(2): 270–277. <https://doi.org/10.1134/S1061933X17020132>
17. Sun Q., Aguila B, Perman J., ... Ma S. Bio-inspired nano-traps for uranium extraction from seawater and recovery from nuclear waste. *Nature Communications*. 2018;9: 1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04032-y>
18. Ivanov A. I., Leggett C. J., Parker B. F., ... Rao L. Origin of the unusually strong and selective binding of vanadium by polyamidoximes in seawater. *Nature Communications*. 2017; 8: 1560. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01443-1>
19. Mullen L., Gong C., Czerwinski K. Complexation of uranium (VI) with the siderophore desferrioxamine B. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2017;273: 683–688. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-0931-5>
20. Abney C. W., Mayes R. T., Saito T., Dai S. Materials for the recovery of uranium from seawater. *Chemical Review*. 2017;117: 13935. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00355>
21. Hadjithoma S., Papanikolaou M. G., Leontidis E., Kabanos T. A., Keramidis A. D. Bis (hydroxylamino)triazines: high selectivity and hydrolytic stability of hydroxylamine-based ligands for uranyl compared to vanadium (V) and iron (III). *Inorganic Chemistry*. 2018;57: 7631. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b00582>
22. Parker B. F., Zhang Z., Rao L., Arnold J. An overview and recent progress in the chemistry of uranium extraction from seawater. *Dalton. Transactions*. 2018; 47: 639. <https://doi.org/10.1039/C7DT04058J>
23. Hao M., Xie Y., Chen Z., ... Wang X. Promising porous materials for uranium extraction from seawater. *Fundamental Research*. 2026;6(1): 170–172. <https://doi.org/10.1016/j.fmr.2024.03.004>
24. Zhang Y., Wang Y., Dong Z., ... Liu Y. Boosting uranium extraction from Seawater by microredox reactors anchored in a seaweed-like adsorbent. *Nature Communications*. 2024;15: 9124. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53366-3>
25. Zhang D., Liu L., Zhao B., Wang X., Pang H., Yu S. Highly efficient extraction of uranium from seawater by polyamide and amidoxime cofunctionalized MXene. *Environmental Pollution*. 2023;15: 120826. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120826>
26. Nekrasova N.A., Kudryavtseva S.P., Milyutin V.V., Chuveleva E.A., Firsova L.A., Gelis V.M. Sorption of uranium from nitric acid solutions on various ion exchangers. *Radiochemistry*. 1984;50(2): 183–185. <https://doi.org/10.1134/s1066362208020173>
27. Sazonova, V. F., Perlova, O. V., Perlova, N. A., Polikarpov A. P. Sorption of uranium(VI) compounds on fibrous anion exchanger surface from aqueous solutions. *Colloid Journal*. 2017;79: 270–277. <https://doi.org/10.1134/S1061933X17020132>
28. Лаптев Ф. Ф. *Анализ воды*. М.: Гостгеолтехиздат. 1985; 42с.
29. Yang L., Li Y., Chen D., ... Tang J. Efficient cooperative extraction uranium(VI) from aqueous solution and seawater by a novel phosphate/amidoxime chitosan-based adsorbent. *Journal of Water Process Engineering*. 2024;61: 105197 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105197>
30. Guidez J., Gabriel S. Extraction of uranium from seawater: a few facts. *EPJN - Nuclear Sciences & Technologies*, 2016;2: 10. <https://doi.org/10.1051/epjn/e2016-50059-2>
31. Shi S., Liu J., Shu J., ... Lan T. Uranium(VI) adsorption from carbonate solutions using cetyltrimethylammonium bromide modified purified-bentonite-MOF composite. *Applied Clay Science*. 2023;241: 106986. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106986>
32. Хохлов В. Ю., Селеменев В. Ф., Загородний А. А., Моисеева И. В. Механизм диссоциации карбоксильных катионов. *Журнал физической химии*. 1995;69(12): 2138–

2141. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23630562>

33. Kersten B., Akolkar R., Duval C. E. An electrochemical technique for sensing uranium adsorption and desorption. *Analytica Chimica Acta*. 2023; 1284: 342003. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.342003>

34. Herman D. M., Peacock C. L., Hubbard G. Ch. Surface complexation of U(VI) on goethite ( $\alpha$ -FeOOH). *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008;72: 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.10.023>

### Сведения об авторах

*Манзар Ахмед гызы Рагимли*, к. х. н., доцент, вед. н. с. Института катализа и неорганической химии (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0009-0004-8621-214X>

[ragimlimanزار1950@mail.ru](mailto:ragimlimanزار1950@mail.ru)

*Севиндж Рагим гызы Мамедова*, к. х. н., доцент, с. н. с. Института катализа и неорганической химии (Баку, Азербайджан).

<https://orcid.org/0009-0006-9608-8976>

[edu.office@kqki.science.az](mailto:edu.office@kqki.science.az)

*Поступила в редакцию 28.04.2026; одобрена после рецензирования 12.12.2025; принята к публикации 15.12.2025; опубликована онлайн 01.04.2026.*