

ЕҢБЕК ҚЫЗЫЛ ТУ ОРДЕНДІ  
«Ә. Б. БЕКТҰРОВ АТЫНДАҒЫ  
ХИМИЯ ҒЫЛЫМДАРЫ ИНСТИТУТЫ»  
АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ

# ҚАЗАҚСТАННЫҢ ХИМИЯ ЖУРНАЛЫ

---

---

## ХИМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА

---

---

### CHEMICAL JOURNAL of KAZAKHSTAN

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
«ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКИХ НАУК  
им. А. Б. БЕКТУРОВА»

**3 (71)**

ИЮЛЬ – СЕНТЯБРЬ 2020 г.  
ИЗДАЕТСЯ С ОКТЯБРЯ 2003 ГОДА  
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

АЛМАТЫ  
2020

**Е. Е. ЕРГОЖИН<sup>1</sup>**, **Т. К. ЧАЛОВ<sup>1</sup>**, **Т. В. КОВРИГИНА<sup>1</sup>**,  
**Б. Е. БЕГЕНОВА<sup>2</sup>**, **Е. А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Республика Казахстан,  
<sup>2</sup>Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,  
Петропавловск, Республика Казахстан

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АНИОНИТА НА ОСНОВЕ АНИЛИНА, ЭПИХЛОРГИДРИНА И ПОЛИЭТИЛЕНПОЛИАМИНА ПО ОТНОШЕНИЮ К ИОНАМ СТРОНЦИЯ (II)**

**Аннотация.** Синтезирован полифункциональный анионообменник на основе анилина, эпихлоргидрина и полиэтиленполиамиона. Методами ИК-спектроскопии, элементного и термогравиметрического анализов изучены состав, структура и термическая стойкость. Исследован процесс извлечения ионов стронция методом классической полярографии и найдены зависимости сорбции ионов стронция (II) в статическом режиме в зависимости от кислотности растворов, концентрации ионов металлов и продолжительности контакта ионита с раствором SrCl<sub>2</sub>. Установлено, что полученный ионообменник обладает высокими сорбционными свойствами по отношению к ионам стронция. Научная новизна исследования состоит в том, что впервые была изучена сорбционная зависимость по отношению к ионам Sr<sup>2+</sup> синтезированным ионитом. Практическая значимость данной работы заключается в разработке анионообменника с повышенной извлекающей способностью, которые могут успешно решить проблемы очистки технологических стоков цветной металлургии от ионов стронция (II).

**Ключевые слова:** сорбция, стронций, сорбционная емкость, анионообменник, извлечение.

С развитием ядерной энергетики и родственных ей отраслей промышленности, загрязнение объектов окружающей среды радиоактивными ионами металлов становится серьезной экологической проблемой, которая несет в себе угрозу здоровью людей, поскольку долгоживущие радионуклиды имеют тенденцию к накоплению, легко переносятся на большие расстояния и нередко включаются в биологический круговорот веществ [1]. В связи с этим особенно актуальна задача по разработке эффективных сорбирующих материалов, имеющих простой и дешевый метод получения, а также обладающих высокой емкостью и селективностью по отношению к извлекаемым катионам и надежно удерживающих выделенные из загрязненных растворов радионуклиды в виде удобном для длительного хранения, переработки или захоронения [2].

Стронций является одним из основных загрязнителей радиоактивных сточных вод и широко распространен в ядерном топливе, медицинских и промышленных радиоактивных отходах [3, 4]. Хорошо известно, что стронций обладает длительным периодом полураспада, высокой растворимостью

и высокой биодоступностью. Попав в организм с загрязненной пищей, стронций будет откладываться в костях и костном мозге, что может вызвать рак близлежащих тканей и лейкемию. Поэтому систематические и эффективные методы устранения особенно актуальны для обеспечения устойчивого развития человека и охраны окружающей среды [3–6].

Сорбция является наиболее эффективным подходом в обработке сточных вод, содержащих тяжелые металлы, благодаря низкой стоимости, высокой эффективности и легко регенерируемым сорбентам [7].

В литературе имеется значительное количество публикаций, посвященных изучению особенностей разделения, выделения стронция и очистки его от примесей с помощью анионитов различной структуры [3, 8–10]. Так, авторами [8] установлено, что максимальная сорбционная емкость ( $CE$ ) полимерных комплексообразующих сорбентов различной структуры по отношению к ионам стронция составляет 50 мг·г<sup>-1</sup> при pH раствора от 2.2 до 7.0. В связи с этим, определенный интерес представляет исследование сорбции ионов стронция на полученных нами анионитах, имеющих высокую  $CE$  и содержащих в своей структуре активные группы.

Цель настоящей работы – изучение физико-химических и сорбционных свойств по отношению к ионам стронция (II) полифункциональными анионитами на основе эпоксидных производных ароматических аминов и полиэтиленimina.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Нами из анилина (А) и эпихлоргидрина (ЭХГ) синтезирован эпоксиамин, конденсацией которого с полиэтиленполиамином (ПЭПА) был получен полифункциональный анионит А–ЭХГ–ПЭПА [11].

Сначала из А и ЭХГ в присутствии едкого натра при температуре 50°C в течение 6 ч синтезировали глицидиловое производное амина (эпоксиамин). Затем проводили его поликонденсацию с ПЭПА в растворе диметилформамида (ДМФА) при разных массовых соотношениях, температуре 60–65°C и продолжительности 5–6 ч, после чего реакционную массу отверждали при температуре 100°C в течение 16–24 ч.

Состав и химическую структуру анионита исследовали методами ИК-спектроскопии на приборе ИК-Фурье спектрометр Nicolet 5700 (Thermo Electron Corporation, США) и элементного анализа на анализаторе CHN628 (LECO, США).

Как видно из рисунка 1, в ИК-спектре анионита А–ЭХГ–ПЭПА отсутствуют характеристические полосы (см<sup>-1</sup>) эпоксидных групп (810–920, 1250, 3000–3010) и появляются полосы деформационных колебаний N–H (1599–1600) и валентных колебаний C–N (1020–1220) связей аминогрупп, что свидетельствует о химическом взаимодействии диглицидилового производного А с ПЭИ. Частота при 3500 характеризует появление гидроксильных групп. Поглощение в области 1502–1504, обусловленное валентными

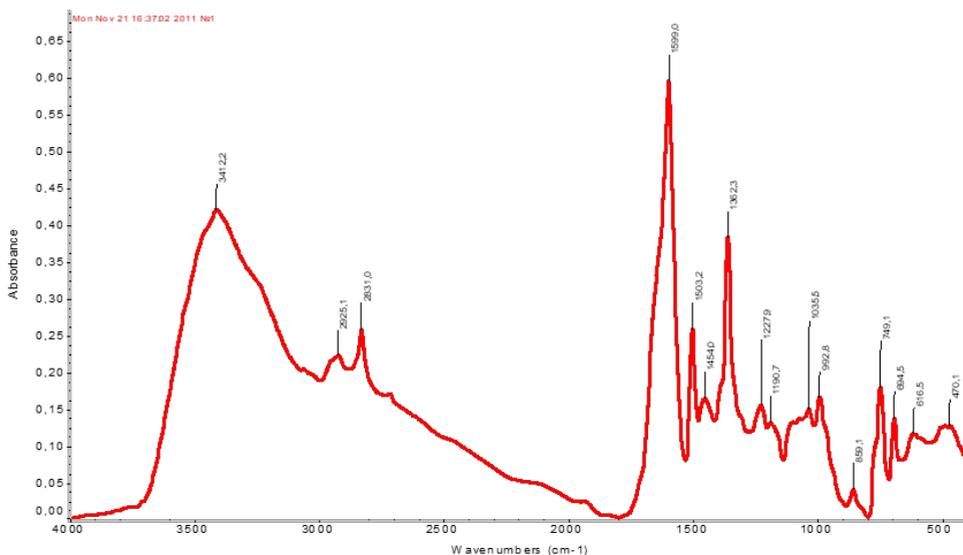
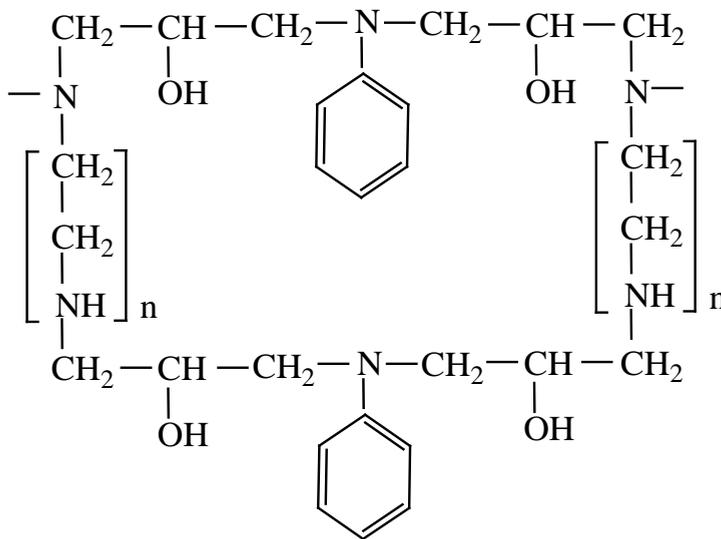


Рисунок 1 – ИК-спектр анионита А-ЭХГ-ПЭПА

колебаниями бензольного кольца, подтверждает наличие ароматических фрагментов в структуре анионита [12].

Элементный состав анионита (найденно / рассчитано), % для А-ЭХГ-ПЭПА: С – 74.23 / 73.84; Н – 16.32 / 16.48; N – 5.76 / 5.50; O – 3.69 / 4.18.

На основании химических и спектральных анализов структуру синтезированных полимеров можно представить следующим образом:



А-ЭХГ-ПЭПА

Морфология и химическая структура полимерной матрицы, а также строение поверхности данного анионита аналогично аниониту, изученному ранее и показанному в работе [13].

Термостойкость анионита в ОН-форме изучали методом термогравиметрического анализа (*TGA*). Девиватограмму снимали на термогравиметрическом анализаторе TGA/DSC1 (Mettler Toledo, Швейцария) на воздухе в интервале температур 20–600°C со скоростью нагрева 10°C/мин.

Для определения статической обменной емкости (*COE*) анионита по 0.1н раствору HCl навеску анионита в ОН-форме в количестве 1 г в пересчете на сухое вещество, взвешенную с точностью до 0.0002 г, заливали 100 мл 0.1 н титрованного раствора соляной кислоты в плоскодонной колбе емкостью 250 мл, плотно закрывали пробкой. После установления равновесия (24 ч) 25 мл фильтрата оттитровывали 0.1 н раствором гидроксида натрия в присутствии трех капель индикатора метилового красного до перехода розовой окраски в желтую. Концентрацию функциональных групп в фазе полимера, соответствующую *COE* (мг-экв·г<sup>-1</sup>) ионита, рассчитывали по формуле:

$$COE = (100 - 4V) / 10 P,$$

где *V* – объем точно 0.1н раствора гидроксида натрия, пошедшего на титрование (мл); *P* – навеска ионита в пересчете на сухое вещество (г).

Для определения объема, занимаемого единицей массы сухого ионита после набухания в водной среде, навеску около 10 г помещали в цилиндр, заливали 70 мл воды. Цилиндр плотно закрывали пробкой, встряхивали до полного смачивания нижних слоев ионита и оставляли на 12 ч в горизонтальном положении. Затем цилиндр возвращали в вертикальное положение, добавляли воду до 100 мл и уплотняли до постоянного объема постукиванием дна цилиндра о деревянную поверхность. После уплотнения измеряли объем, занимаемый ионитом. Удельный объем ионита в набухшем состоянии (*V<sub>уд</sub>*, мл·г<sup>-1</sup>) вычисляли по формуле:

$$V_{уд} = V / G,$$

где *V* – объем набухшего ионита, мл; *G* – навеска сухого ионита, г.

Для определения химической устойчивости ионита по отношению к растворам кислот и щелочей брали две навески ионита по 0.1 г каждая, в пересчете на сухое вещество, помещали в круглодонные колбы с обратным холодильником емкостью 250 мл. Одну навеску заливали 100 мл 5 н раствора серной кислоты, другую – 100 мл 5 н раствора гидроксида натрия. Содержимое колб выдерживали в течение 30 мин на кипящей водяной бане. Затем смесь охлаждали на воздухе до комнатной температуры и отделяли ионит фильтрованием. При необходимости анионит переводили в гидроксильную форму. Иониты отмывали дистиллированной водой и определяли их *COE*.

Химическую стойкость (*ХС*, %) ионитов определяли отношением полученной обменной емкости к исходной:

$$XC = COE / COE_0 * 100,$$

где  $COE_0$  и  $COE$  – статическая обменная емкость ионитов до и после обработки кислотой или щелочью.

Для определения  $XC$  ионита по отношению к растворам окислителей брали навеску ионита (1 г) заливали 100 мл 10% раствора пероксида водорода, выдерживали при комнатной температуре 48 ч при периодическом перемешивании. Ионит отделяли фильтрованием, переводили в гидроксильную форму, отмывали дистиллированной водой и определяли  $COE$ . Стойкость ионита вычисляли по предыдущей формуле.

Сорбцию ионов стронция (II) анионитом А–ЭХГ–ПЭПА в ОН-форме изучали в статических условиях при соотношении сорбент : раствор, равном 1 : 400, комнатной температуре  $20 \pm 2$  °С, варьируя концентрацию ионов стронция в растворах  $SrCl_2$  от 0.184 до 2.015 г·л<sup>-1</sup> и изменяя их кислотность добавлением 5 н раствора HCl в пределах pH от 1.0 до 6.3. Для измерений pH использовали pH–метр pH-150 МИ с погрешностью измерений  $\pm 0,05$  ед. pH. Продолжительность контакта сорбентов с растворами составляла от 0.5 ч до 7 сут. Для приготовления модельных растворов использовали соль  $SrCl_2 \cdot 6H_2O$  квалификации «х.ч.».

$CE$  рассчитывали по разности исходной и равновесной концентраций растворов, которые определяли методом классической полярографии на фоне 0.5 М LiCl по волне восстановления  $Sr^{2+}$  ( $E_{1/2} = -2.03$  В). Полярограммы снимали на универсальном полярографе ПУ-1 с погрешностью измерений  $\pm 0.5\%$  в термостатированной ячейке при температуре  $25 \pm 0.5$  °С, используя ртутный капаяющий электрод. Кислород из анализируемых растворов удаляли путем продувания аргона в течение 5 мин. В качестве электрода сравнения служил насыщенный каломельный электрод. Были выбраны режимы сорбционных экспериментов (соотношение «сорбент–раствор», концентрация и pH стронций содержащих модельных растворов и время контакта), близкие к промышленным.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для практического применения ионитов необходимо изучение их физико-химических свойств, а также сорбции ионов металлов в зависимости от условий процесса. С целью определения оптимальных параметров сорбции исследовано влияние концентрации и pH растворов  $SrCl_2$ , а также продолжительности их контакта с ионитами на извлечение ионов стронция (II).

В таблице 1 приведены основные физико-химические характеристики синтезированного анионита, которые определяли по методикам [14, 15].

К ионообменникам, предназначенным для длительной эксплуатации при повышенных температурах, предъявляются жесткие требования к их термостойкости [16]. Термостабильность является важной характеристикой полимерных материалов, позволяющей судить о протекании в них при повышенных температурах деструктивных процессов, приводящих к ухудшению

Таблица 1 – Основные физико-химические свойства синтезированных анионитов

Аниониты на основе	СОЕнСI, мг-экв·г <sup>-1</sup>	V <sub>уд</sub> , мл·г <sup>-1</sup>	Химическая устойчивость в растворах, %		
			5 н H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5 н NaOH	10% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
А-ЭХГ-ПЭПА	3,03	4,2	89,9	91,4	70,0

эксплуатационных свойств и загрязнению окружающей среды. Процессы деструкции ионитов в сухом состоянии позволяют в значительной мере оценить термическую стабильность матрицы и ионогенных групп и определить начальные температуры деструкции этих элементов структуры.

Дериватограмма анионита А-ЭХГ-ПЭПА представлена на рисунке 2.

a)

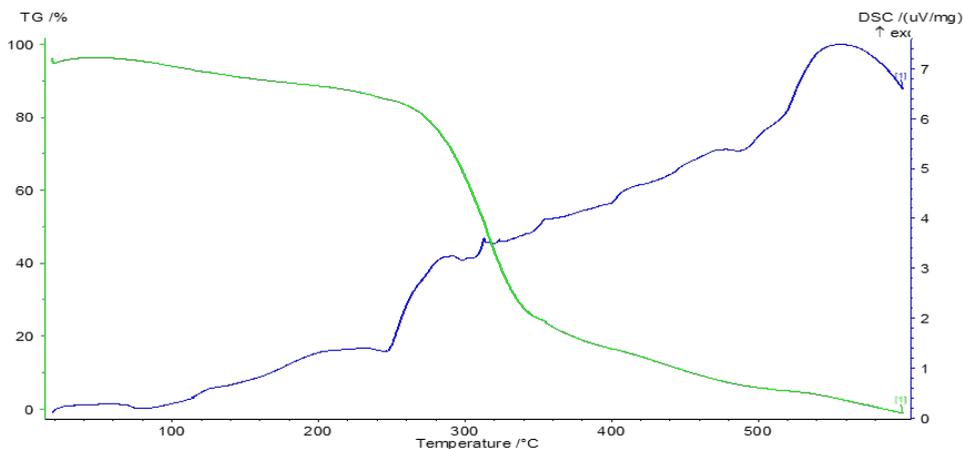


Рисунок 2 – Термогравиметрический анализ анионита на основе А-ЭХГ-ПЭПА.

$T$  – температура (°C),  $DSC$  – зависимость теплоемкости (Дж·10<sup>3</sup>·мг<sup>-1</sup>),  
 $TG$  – потеря массы (%)

Использование  $TGA$  дает возможность определить потерю массы ионита в процессе термодеструкции. Результаты  $TGA$  анионита на основе эпоксидного производного анилина и полиэтиленполиамина приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Потеря массы анионитов А-ЭХГ-ПЭПА при различной температуре

$T$ , °C	Потеря массы, %
100	5
200	12
300	35
350	77
400	82

Из кривых ТГА (рисунок 2) видно, что начальная температура их деструкции, после которой начинается резкое уменьшение массы, составляет 260°C. Этой температуре на кривых дифференциальной сканирующей калориметрии соответствует появление экзотермических максимумов, наличие которых, вероятно, обусловлено выделением тепла при дальнейшем структурировании ионитов, после чего происходит деструкция полимерной матрицы. При этом потеря массы составляет 8%. В сравнении промышленный сорбент ЭДЭ-10п при нагревании до 100–200°C теряет более 20% своей массы [17].

Установлено, что данный анионообменник характеризуется довольно высокой термостойкостью. Структура полимерной матрицы оказывает существенное влияние на термостабильность анионита.

Как видно из рисунка 3, где представлена изотерма сорбции ионов Sr<sup>2+</sup>, СЕ анионита возрастает с повышением содержания ионов стронция в растворах. Подъем кривой при малой равновесной концентрации свидетельствует о том, что данный анионит извлекает ионы стронция (II) с достаточной полнотой. При этом степень извлечения достигает порядка 83%, а СЕ анионита составляет 281.6 мг·г<sup>-1</sup>.

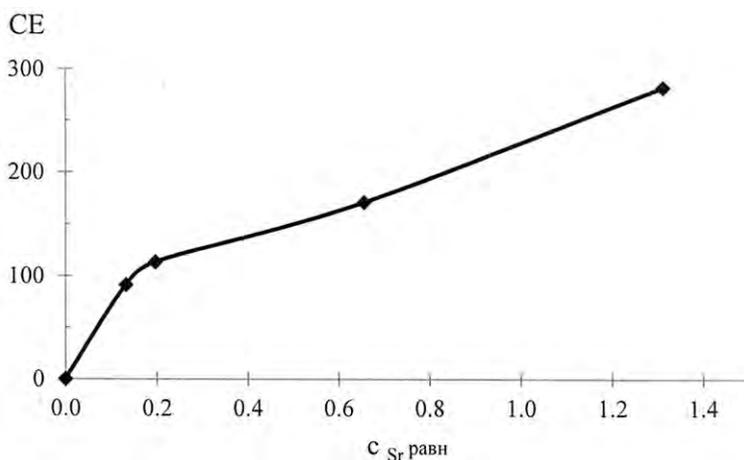


Рисунок 3 – Изотерма сорбции ионов Sr<sup>2+</sup> анионитом А-ЭХГ-ПЭПА. Продолжительность контакта 7 сут, рН = 1.0.  $c_{\text{равн}}$  – равновесная концентрация. СЕ – сорбционная емкость (мг·г<sup>-1</sup>),  $c_{Sr \text{ равн}}$  – равновесная концентрация (г·л<sup>-1</sup>)

Одним из важнейших факторов при извлечении ионов металлов из раствора является значение кислотности среды, влияющее как на форму, в которой находится в растворе исследуемый ион, так и на состояние ионогенных групп [11]. Из рисунка 4, где представлена кривая, описывающая зависимость сорбционной емкости анионита по ионам стронция от кислотности растворов SrCl<sub>2</sub>, видно, что оптимальным значением рН для их извлечения является 1.0. В этих условиях происходит максимальное поглощение ионов стронция (II).

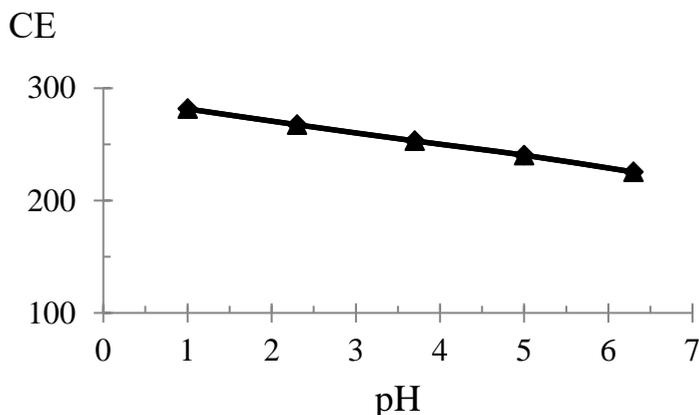


Рисунок 4 – Зависимость сорбции ионов  $\text{Sr}^{2+}$  анионом А–ЭХГ–ПЭПА от кислотности раствора  $\text{SrCl}_2$ .  $c_{\text{Sr}} = 2,015 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ , время контакта 7 сут.

Из данных рисунка 4 также следует, что поглощающая способность ионитов в значительной мере определяется ионным состоянием стронция в растворе. Диапазон кислотности среды, соответствующий максимальной  $CE$ , обусловлен, с одной стороны, соотношением энергии взаимодействия катионов металла и водорода с активными центрами полимера, а с другой стороны – значениями  $\text{pH}$  среды, определяющими начало образования осадков гидроксидов и основных солей металлов. Дальнейшее понижение кислотности раствора приводит к выпадению осадка гидроксида стронция. Указанные факты свидетельствуют о необходимости предварительного доведения кислотности очищаемой воды до определённого значения  $\text{pH}$ .

На рисунке 5 представлены изотерма сорбции ионов стронция (II) анионом А–ЭХГ–ПЭПА в зависимости от времени его контакта с раствором

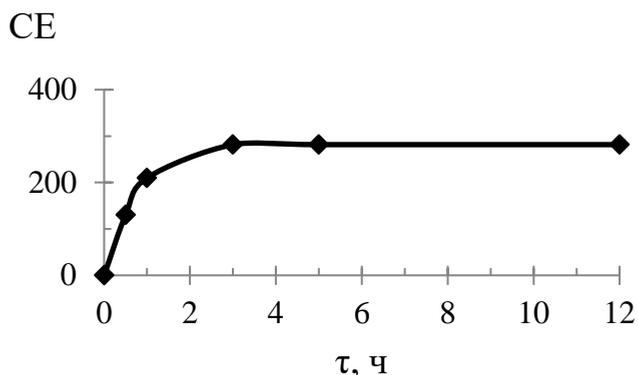


Рисунок 5 – Зависимость сорбции ионов стронция (II) анионом А–ЭХГ–ПЭПА от продолжительности его контакта с раствором  $\text{SrCl}_2$  ( $c_{\text{Sr}} = 2,015 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 1,0$ )

SrCl<sub>2</sub>. Равновесное состояние между ионитами и раствором, содержащим 2.015 г·л<sup>-1</sup> стронция и имеющим рН 1.0, наступает для анионита А-ЭХГ-ПЭПА – через 3 ч и значение *CE* достигает 281.6 мг·г<sup>-1</sup>.

Авторами [8] установлено, что полимерные комплексообразующие сорбенты различной структуры, содержащие ионообменные группы –CH<sub>2</sub>–NH–, более полно извлекают ионы Sr<sup>2+</sup> в кислых средах. Сорбент, которым авторы [18] извлекали ионы стронция, показывает максимальные значения 40.6 мг·г<sup>-1</sup>. На основании экспериментальных данных установлено, что наиболее перспективными для практического использования являются сорбенты, обладающие наилучшими кинетическими характеристиками и максимальной *CE*, которая составляет 3.5–50.0 мг·г<sup>-1</sup>, т.е. в 5.6 раз меньше, чем у синтезированного нами ионообменника, обладающего наибольшими кинетическими свойствами.

Таким образом, изучены основные физико-химические и термические свойства полученного сорбента и установлены его состав и структура. Исследована сорбционная способность синтезированного анионита на основе эпоксидного производного анилина и полиэтиленполиамина по отношению к ионам стронция (II). Установлено, что он обладает высоким сродством по отношению к ионам Sr<sup>2+</sup> при их извлечении из индивидуальных модельных растворов SrCl<sub>2</sub>. Найдено, что кислотность среды в интервале рН = 1.0 – 6.3 оказывает влияние на сорбцию ионов стронция (II). Максимальное значение сорбции наблюдается при рН = 1.0. Полученный анионит А-ЭХГ-ПЭПА обладает высокими кинетическими свойствами. Полное химическое равновесие наступает через 3 ч.

Работа выполнена по гранту Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № AP05131439 на тему «Синтез и модификация наноструктурных ионообменных мембран и создание на их основе инновационных систем водоподготовки».

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Полякова У.В., Масленникова Т.П., Синельщикова О.Ю. Сорбция ионов стронция на калий-титанатных наноматериалах, полученных в гидротермальных условиях // Труды XVI Молодежной научной конференции ИХС РАН «3D печать керамических композитов для конструкций, работающих в условиях экстремальных нагрузжений». – 2017. – С. 45-47.
- [2] Китикова Н.В., Иванец А.И., Шашкова И.Л., Радкевич А.В., Шемет Л.В., Зарубо А.М. Фосфатные сорбенты на основе доломита для извлечения радионуклидов кобальта и стронция из модельных растворов морской воды // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, № 2-1. – С. 279-285. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.279-285>
- [3] Ahmadpour A., Zabihi M., Tahmasbi M., Rohani Bastami T. Effect of adsorbents and chemical treatments on the removal of strontium from aqueous solutions // Journal of Hazardous Materials. – 2010. – Vol. 182. Iss. 1-3. – P. 552-556. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.067>
- [4] Zuo R., Meng-L., Guan X., Wang J., Yang J., Lin Y. Removal of strontium from aqueous solutions by acrylamide-modified attapulgite // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2019. – Vol. 319. – P. 1207-1217. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06414-y>
- [5] Wang H., Wang X.J., Ma J.X., Xia P., Zhao J.F. Removal of cadmium(II) from aqueous solution: a comparative study of raw attapulgite clay and a reusable waste-struvite/attapulgite obtained

from nutrient-rich wastewater // *Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – Vol. 329. – P. 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.01.025>

[6] Zhao Y., Shao Z.Y., Chen C.L., Hu J., Chen H.L. Effect of environmental conditions on the adsorption behavior of Sr(II) by Na-rectorite // *Applied Clay Science*. – 2014. – Vol. 87. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.021>

[7] Baccar R., Bouzid J., Feki M., Montiel A. Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 162. – P. 1522-1529. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.041>

[8] Anikin V.Y., Tarasova O.V., Basargin N.N., Rozovskii Y.G. Strontium (II) sorption by complexing polymeric sorbents with various structures // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2009. – Vol. 54, № 9. – P. 1507-1511. <https://doi.org/10.1134/S0036023609090289>

[9] Bhosle S.M., Ponrathnam S, Tambe S.S., Chavan N.N. Adsorption of strontium (II) metal ions using phosphonate-functionalized polymer // *Bulletin of Materials Science*. – 2016. – Vol. 39. – P. 1541-1556. <https://doi.org/10.1007/s12034-016-1295-7>

[10] Mayordomo N., Alonso U., Missana T. Effects of  $\gamma$ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach // *Applied Geochemistry*. – 2019. – Vol. 100. – P. 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.012>

[11] Ergozhin E.E., Chalov T.K., Kovrigina T.V., Melnikov Ye.A., Nikitina A.I. Performance of anion exchangers based on aniline, epichlorohydrin, and polyamines in sorption of molybdenum (VI) ions // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2017. – Vol. 90, № 5. – P. 769-774. <https://doi.org/10.1134/S1070427217050172>

[12] Böcker J. Spektroskopie: Instrumentelle Analytik mit Atom- und Molekülspektrometrie. – Vogel, 1997.

[13] Ergozhin E.E., Chalov T. K., Kovrigina T.V., Serikbaeva K.T., Nikitina A.I. Recovery of perchlorate ions with a macrocellular anion exchanger based on epoxidized monoethanolamine vinyl ether, allyl glycidyl ether, and polyethyleneimine // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2013. – Vol. 86, № 10. – P. 1545-1548. <https://doi.org/10.1134/S1070427213100121>

[14] Naushad M, Al-Othman Z.A. A Book on Ion Exchange, Adsorption and Solvent Extraction. – Nova, 2013. – 350 p.

[15] Тулупов П.Е. Стойкость ионообменных материалов. – М.: Химия, 1984. – 232 с.

[16] Manas Chanda. *Plastics Technology Handbook*. – CRC Press, 2017. – 1709 p.

[17] Мельников Е.А., Хакимболатова К.Х., Никитина А.И., Ергожин Е.Е., Чалов Т.К. Исследование термической устойчивости ионообменных материалов на основе эпоксиаминов // Сб. материалов «Школа научно-технического творчества и концептуального проектирования». – 2012. – С. 61-63.

[18] Zhang L., Wei J., Zhao X., Li F., Jiang F., Zhang M. Strontium (II) adsorption on Sb (III)/Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> // *Chemical Engineering Journal*. – 2015. – Vol. 267. – P. 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.124>

## REFERENCES

[1] Polyakova U.V., Maslennikova T.P., Sinel'shchikova O.Yu. Sorbciya ionov stronciya na kalij-titanatnyh nanomaterialah, poluchennyh v gidrotermal'nyh usloviyah // *Trudy XVI Molodezhnoj nauchnoj konferencii IHS RAN «3D pechat' keramicheskikh kompozitov dlya konstrukcij, rabotayushchih v usloviyah ekstremal'nyh nagruzenij»*. 2017. P. 45-47.

[2] Kitikova N.V., Ivanec A.I., SHashkova I.L., Radkevich A.V., SHemet L.V., Zarubo A.M. Fosfatnye sorbenty na osnove dolomita dlya izvlecheniya radionuklidov kobal'ta i stronciya iz model'nyh rastvorov morskoy vody // *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. 2018. Vol. 9, № 2-1. P. 279-285. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.279-285>

[3] Ahmadpour A., Zabihi M., Tahmasbi M., Rohani Bastami T. Effect of adsorbents and chemical treatments on the removal of strontium from aqueous solutions // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 182. Iss. 1-3. P. 552-556. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.067>

- [4] Zuo R., Meng L., Guan X., Wang J., Yang J., Lin Y. Removal of strontium from aqueous solutions by acrylamide-modified attapulgite // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2019. Vol. 319. P. 1207-1217. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06414-y>
- [5] Wang H., Wang X.J., Ma J.X., Xia P., Zhao J.F. Removal of cadmium(II) from aqueous solution: a comparative study of raw attapulgite clay and a reusable waste-struvite/attapulgite obtained from nutrient-rich wastewater // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 329. P. 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.01.025>
- [6] Zhao Y., Shao Z.Y., Chen C.L., Hu J., Chen H.L. Effect of environmental conditions on the adsorption behavior of Sr(II) by Na-rectorite // *Applied Clay Science*. 2014. Vol. 87. P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.021>
- [7] Baccar R., Bouzid J., Feki M., Montiel A. Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 162. P. 1522-1529. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.041>
- [8] Anikin V.Y., Tarasova O.V., Basargin N.N., Rozovskii Y.G. Strontium (II) sorption by complexing polymeric sorbents with various structures // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2009. Vol. 54, № 9. P. 1507-1511. <https://doi.org/10.1134/S0036023609090289>
- [9] Bhosle S.M., Ponrathnam S, Tambe S.S., Chavan N.N. Adsorption of strontium (II) metal ions using phosphonate-functionalized polymer // *Bulletin of Materials Science*. 2016. Vol. 39. P. 1541-1556. <https://doi.org/10.1007/s12034-016-1295-7>
- [10] Mayordomo N., Alonso U., Missana T. Effects of  $\gamma$ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach // *Applied Geochemistry*. 2019. Vol. 100. P. 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.012>
- [11] Ergozhin E.E., Chalov T.K., Kovrigina T.V., Melnikov Ye.A., Nikitina A.I. Performance of anion exchangers based on aniline, epichlorohydrin, and polyamines in sorption of molybdenum (VI) ions // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017. Vol. 90, № 5. P. 769-774. <https://doi.org/10.1134/S1070427217050172>
- [12] Böcker J. *Spektroskopie: Instrumentelle Analytik mit Atom- und Molekülspektrometrie*. Vogel, 1997.
- [13] Ergozhin E.E., Chalov T. K., Kovrigina T.V., Serikbaeva K.T., Nikitina A.I. Recovery of perchlorate ions with a macrocellular anion exchanger based on epoxidized monoethanolamine vinyl ether, allyl glycidyl ether, and polyethyleneimine // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2013. Vol. 86, № 10. P. 1545-1548. <https://doi.org/10.1134/S1070427213100121>
- [14] Naushad M, Al-Othman Z.A. *A Book on Ion Exchange, Adsorption and Solvent Extraction*. Nova, 2013. 350 p.
- [15] Tulupov P.E. *Stojkost' ionoobmennyykh materialov*. M.: Himiya. 1984. 232 p.
- [16] Manas Chanda. *Plastics Technology Handbook*. CRC Press, 2017. 1709 p.
- [17] Melnikov E.A., Khakimbatova K.Kh., Nikitina A.I., Ergozhin E.E., Chalov T.K. Issledovanie termicheskoy ustojchivosti ionoobmennyykh materialov na osnove epoksiaminov // *Sb. materialov «Shkola nauchno-tehnicheskogo tvorchestva i konceptual'nogo proektirovaniya»*. 2012. P. 61-63.
- [18] Zhang L., Wei J., Zhao X., Li F., Jiang F., Zhang M. Strontium (II) adsorption on Sb (III)/Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 267. P. 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.124>

**Резюме**

**Е. Е. Ергөзжин**, Т. К. Чалов, Т. В. Ковригина, Б. Е. Бегенова, Е. А. Мельников

**СТРОНЦИЙ (II) ИОНДАРЫНА ҚАТЫСТЫ АНИЛИН, ЭПИХЛОРОГИДРИН ЖӘНЕ ПОЛИЭТИЛЕНПОЛИАМИН НЕГІЗІНДЕГІ АНИОНИТТІҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ СОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ**

Анилин, эпихлоргидрин және полиэтиленполиамин негізінде полифункционалды анион алмастырғыш синтезделді. ИК-спектроскопия, элементтік және термогравиметриялық талдау әдістерімен құрамы, құрылымы және термиялық төзімділігі зерттелді. Классикалық полярография әдісімен стронций иондарын алу процесі зерттелді және ерітінділердің қышқылдығына, металл иондарының концентрациясына және иониттің SrCl<sub>2</sub> ерітіндісімен байланысу ұзақтығына байланысты статикалық режимде стронций (II) иондарының сорбциясына тәуелділіктер табылды. Алынған ион алмастырғыштың стронций иондарына қатысты жоғары сорбциялық қасиеттері бар екендігі анықталды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы Sr<sup>2+</sup> синтезделген ионит иондарына сорбциялық тәуелділік алғаш рет зерттелді. Бұл жұмыстың практикалық маңыздылығы түсті металлургияның технологиялық ағындыларын стронций (II) иондарынан тазарту проблемаларын табысты шеше алатын жоғары алу қабілеті бар анион алмастырғышты әзірлеуде жатыр.

**Түйін сөздер:** сорбция, стронций, сорбция сыйымдылығы, анион алмастырғыш, экстракция.

**Summary**

**Е. Е. Ergozhin**, T. K. Chalov, T. V. Kovrigina, B. Ye. Begenova, Ye. A. Melnikov

**PHYSICO-CHEMICAL AND SORPTION PROPERTIES OF ANIONITE BASED ON ANILINE, EPICHLOROHYDRIN AND POLYETHYLENE POLYAMINE IN RELATION TO STRONTIUM (II) IONS**

A multifunctional anion exchanger based on aniline, epichlorohydrin and polyethylene polyamine was synthesized. The composition, structure, and thermal stability were studied using IR spectroscopy, elemental analysis, and thermogravimetric analysis. The process of extracting strontium ions by classical polarography was studied and the dependence of the sorption of strontium (II) ions in static mode was found depending on the acidity of solutions, the concentration of metal ions and the duration of contact of the ionite with the SrCl<sub>2</sub> solution. It was found that the resulting ion exchanger has high sorption properties in relation to strontium ions. The scientific novelty of the study is that the sorption dependence on Sr<sup>2+</sup> ions synthesized by ionite was studied for the first time. The practical significance of this work is to develop an anion exchanger with increased recovery capacity, which can successfully solve the problems of cleaning process effluents of non-ferrous metallurgy from strontium (II) ions.

**Keywords:** sorption, strontium, sorption capacity, anion exchange, extraction.