

## Сорбция ионов свинца и кадмия из водных растворов модифицированным цеолитом

Тельхожаева М.С.\*, Сейлханова Г.А.,  
Рахым А.Б., Имангалиева А.Н.,  
Акбаева Д.Н.

Казахский национальный университет  
имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан  
\*E-mail: [telkhozhayeva@gmail.com](mailto:telkhozhayeva@gmail.com)

В настоящей статье представлены результаты исследования процессов сорбции ионов свинца и кадмия модифицированным цеолитом Чанканайского месторождения. В качестве модификатора использовался хитозан, являющийся единственным поликатионом природного происхождения, нетоксичным и биосовместимым. Процесс сорбции проведен в статических условиях при температуре 295 К и при pH=7. Полученный сорбент был исследован с помощью следующих методов: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), элементный анализ; концентрация ионов токсичных металлов до и после сорбции определялась атомно-абсорбционным методом (ААС). Установлено соотношение Si/Al в цеолите, которое составляет 1,66, что показывает перспективность использования данного материала в качестве исходного объекта. Определены и сравнены статические обменные емкости (СОЕ) сорбентов и степень извлечения ионов тяжелых металлов. Установлено, что с увеличением времени сорбции, при высоких концентрациях ионов металлов, в нейтральной среде сорбенты на основе цеолита и хитозана максимально извлекают ионы свинца (степень извлечения 99%). Определено, что СОЕ модифицированного цеолита по  $Pb^{2+}$  и  $Cd^{2+}$  составляет  $(0,86\pm 0,03)$  мг/г и  $(0,68\pm 0,03)$  мг/г соответственно. Результаты исследований показали, что цеолит, модифицированный хитозаном, является эффективным адсорбентом для извлечения ионов свинца и кадмия из водных растворов.

**Ключевые слова:** цеолит; хитозан; сорбция; ионы свинца (II); ионы кадмия (II); степень извлечения.

## Сулы ерітінділерден модифицирленген цеолитпен қорғасын мен кадмий иондарының сорбциясы

Тельхожаева М.С.\*, Сейлханова Г.А.,  
Рахым А.Б., Имангалиева А.Н.,  
Акбаева Д.Н.

Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық  
университеті, Алматы, Қазақстан  
\*E-mail: [telkhozhayeva@gmail.com](mailto:telkhozhayeva@gmail.com)

Бұл жұмыста Шанқанай кен орнының модифицирленген цеолиттің қорғасын мен кадмий иондарына сорбциялық сипаттамаларының нәтижелері ұсынылған.

Модификатор ретінде хитозан қолданылды, себебі ол табиғи және улы емес, биоүйлесімді поликатион болып саналады. Сорбция процесі 295 К температурада және pH=7 кезінде статикалық жағдайларда жүзеге асырылды. Алынған сорбент келесі әдістермен зерттелді: сканерлік электрондық микроскопия (СЭМ), элементтік талдау; улы металдардың иондарының концентрацияларын сорбцияға дейін және одан кейін атомды сіңіру әдісімен анықталды. Цеолиттегі Si/Al қатынасы 1,66 болып табылды, сондықтан бұл материалды бастапқы материал ретінде келешекте перспективті қолдануы көрсетілді. Сорбенттердің статикалық алмасу сыйымдылықтары (САС) және ауыр металдар иондарының өндіру дәрежелері анықталды және салыстырылды. Цеолит пен хитозанға негізделген сорбенттер бейтарап ортада сорбциялық уақыты ұлғайған сайын, металл иондарының жоғары концентрациясында қорғасын ионының өндіру дәрежесін максималды түрде арттырады (өндіру дәрежесі 99%). Модификацияланған цеолиттің САС мәндері  $Pb^{2+}$  мен  $Cd^{2+}$  иондары бойынша тиісінше  $(0,86\pm 0,03)$  мг/г және  $(0,68\pm 0,03)$  мг/г құрайды. Зерттеу нәтижелері, хитозанмен модифицирленген цеолит сулы ерітінділерден қорғасын мен кадмий иондарын алу үшін тиімді адсорбент болып табылады.

**Түйін сөздер:** цеолит; хитозан; сорбция; қорғасын (II) ионы; кадмий ионы (II); өндіру дәрежесі.

## Sorption of lead and cadmium ions from aqueous solutions using modified zeolite

Telkhozhayeva M.S.\*, Seilkhanova G.A.,  
Rakhym A.B., Imangaliyeva A.N.,  
Akbaeva D.N.

Al-Farabi Kazakh National University,  
Almaty, Kazakhstan  
\*E-mail: [telkhozhayeva@gmail.com](mailto:telkhozhayeva@gmail.com)

The processes of lead and cadmium ions sorption by modified zeolite of Chankanai deposit were studied. Chitosan was used as a surface modifier due to its properties: nontoxicity, biodegradability and biocompatibility. The adsorption process was carried out at room temperature (295 K) and pH 7 under static conditions. The synthesized sorbent has been characterized by scanning electron microscopy (SEM), elemental analysis; the concentrations of Pb(II) and Cd(II) ions before and after adsorption were determined using atomic absorption spectroscopy (AAS). The Si/Al ratio of the zeolite was found to be 1.66, which showed the prospects of using this material as a source object. The static exchange capacity (SEC) of sorbents and the extraction degree of heavy metal ions were determined and compared. It was found that the removal of heavy metal ions increased with the increase of contact time (removal efficiency was  $99.1\pm 1.2\%$  for  $Pb^{2+}$  and  $83.4\pm 1.2\%$  for  $Cd^{2+}$ ). The adsorption capacity values of the modified zeolite for metal ions were  $(0.86\pm 0.03)$  mg/g for Cd(II) and  $(0.68\pm 0.03)$  mg/g for Pb(II). Chitosan-modified zeolite proved to be an effective adsorbent for removal of lead and cadmium ions from aqueous solutions.

**Keywords:** zeolite; chitosan; sorption; lead (II) ions; cadmium (II) ions; extraction effectiveness.



## Сорбция ионов свинца и кадмия из водных растворов модифицированным цеолитом

Тельхожаева М.С.\*, Сейлханова Г.А., Рахым А.Б., Имангалиева А.Н., Акбаева Д.Н.

Казакхский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казакхстан

\*E-mail: [telkhozhayeva@gmail.com](mailto:telkhozhayeva@gmail.com)

### 1. Введение

Экологическое загрязнение окружающей среды имеет негативный эффект в виде различных заболеваний, обусловленных появлением и аккумуляцией в организме патогенных компонентов. Такими компонентами могут быть: аутоантитела, циркулирующие иммунные комплексы, эндогенные и экзогенные токсины, вирусы, микроорганизмы, а также ионы тяжелых металлов. Тяжелые металлы опасны тем, что путем миграции по пищевым цепям, они попадают в организм человека, и обладая способностью накапливаться в живых организмах и вмешиваться в метаболический цикл, образуют высокотоксичные металлосодержащие органические соединения, вызывая тем самым единовременные и хронические отравления. Поэтому актуальной проблемой является поиск эффективных энтеросорбентов, способных снизить их аккумуляцию в организме и отвечающих основным требованиям, а именно: абсолютная безвредность и нетоксичность, высокая биосовместимость и адсорбционная емкость, избирательная сорбция низкомолекулярных токсичных соединений и полное отсутствие побочных эффектов [1]. Такими свойствами обладают сорбенты из природных продуктов, среди которых особое место занимают природные цеолиты благодаря своим исключительным свойствам: ионообменным, адсорбционным, каталитическим, широкой распространенности в природе, доступности, низкой стоимости и возможности многократной регенерации [2]. Цеолиты являются алюмосиликатами каркасной структуры. Кристаллическая решетка цеолитов сконструирована из тетраэдров  $TO_4$  (Т – центральный атом кислорода), таким образом, что каждый атом кислорода, который находится в вершине каждого тетраэдра, является и вершиной для

соседнего тетраэдра. То есть, кристаллическая структура образована тетраэдрическими фрагментами  $[SiO_4]^{4-}$  и  $[AlO_4]^{5-}$ , группирующимися общими вершинами в трехмерный каркас, пронизанный полостями и каналами (окнами) размером 0,2-1,5 нм [3]. Но, в то же время известно, что модифицирование цеолитов позволяет увеличить адсорбционную емкость сорбента и улучшить эффективность очистки [4]. Авторы работы [5] исследовали сорбцию меди, никеля, цинка и серебра на Сибайском цеолите, модифицированном тиомочевинной и моноэтаноламинном. В работе [6] был проведен сравнительный анализ сорбционной способности клиноптилолита и его аналога, модифицированного Fe(III), по отношению к ионам свинца.

Известно, что хитозан эффективно захватывает катионы токсичных металлов и/или их анионы посредством хелирования или электростатического взаимодействия [7]. Являясь практически единственным поликатионом природного происхождения, хитозан нетоксичен, биосовместим, а также биоразлагаем, что исключает возможность его накопления в организме человека и окружающей среде. Поэтому, он легко может быть модифицирован различными физическими и химическими методами для того, чтобы синтезировать желаемый биосорбент с хорошей сорбционной способностью и избирательностью по отношению к рассматриваемым металлам. Так, например, для увеличения адсорбционных свойств хитозан смешивают с монтмориллонитом, полиуретаном, бентонитом и перлитом [9-11].

Для исследований выбраны два тяжелых металла – свинец и кадмий ввиду высокой токсичности и распространенности. Проанализированы литературные данные по различным адсорбентам, применяемым для извлечения ионов исследуемых металлов. Среди них

модифицированная каолиновая глина [12], ореховая скорлупа [13], рисовая шелуха [14], бентонитовая глина [15], ананасовые отходы [16] и т.д.

Таким образом, практическое применение полимерных композиций-сорбентов для детоксикации живых организмов и для очистки водных растворов от солей тяжелых металлов, удовлетворяющих определенным требованиям, в настоящее время остается актуальной проблемой в области химии и химической технологии. В связи с этим, целью настоящей работы являлось изучение сорбционной активности цеолита, модифицированного хитозаном, в отношении ионов свинца и кадмия.

## 2. Экспериментальная часть

В настоящей работе были использованы следующие вещества: цеолит Чанканайского месторождения, которое является одним из наиболее крупных в Республике Казахстан, расположенное в Кербулакском районе Алматинской области, неподалеку от г. Сары-Озек; хитозан (Tokyo Chemical Industry Co., LTD, Япония); сульфат кадмия  $CdSO_4 \cdot 8H_2O$  марки х.ч. (Уральский завод химических реактивов, Россия); нитрат свинца  $Pb(NO_3)_2$  марки х.ч. (Донецкий завод химических реактивов, Украина). Для всех экспериментов была использована бидистиллированная вода.

Для получения модифицированного сорбента цеолит природного происхождения измельчали, предварительно очистив от механических примесей (мусора). К навеске хитозана (0,24 г) добавили 5 мл дистиллированной воды и оставили на 1 час для частичного растворения навески. К полученному вязкому раствору хитозана добавили измельченный цеолит (0,5 г). Для получения готового модифицированного сорбента все содержимое стакана перемешивали в динамической мешалке в течение 5 часов. Далее проводили процесс сушки при  $T=358-373$  К в течение 3-4 часов; полученный сорбент измельчали до получения однородной порошкообразной текстуры.

Изучение процесса сорбции ионов тяжелых металлов осуществляли в статических условиях при  $T=295 \pm 2$  К и  $pH=7$  из водных растворов сульфата кадмия и нитрата свинца при перемешивании.

Для получения изотерм сорбции в серию пробирок помещали навески ( $m$ ) сорбента по 0,5 г и заливали их 5 мл ( $V$ ) водного раствора сульфата кадмия и нитрата свинца с разными начальными концентрациями в диапазоне от 2 до 18 мг/л, выдерживали до установления состояния равновесия в течение 24 часов. Для каждой концентрации проводили 3 параллельных эксперимента. Затем раствор отделяли от сорбента фильтрованием и определяли в нем концентрацию ионов металла на атомно-абсорбционном спектрометре AA-6200, (Shimadzu, Япония).

Для того, чтобы описать морфологию модифицированной формы сорбента, была использована

сканирующая электронная микроскопия (SEM/EDAX). Исследования морфологии образцов проведены на микроскопе QUANTA 3D 200i (FEI, США) в Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа при КазНУ им. аль-Фараби. Были получены данные, представленные на рисунке 1.

Статическую сорбционную емкость сорбента ( $A$ ) в каждый данный момент времени рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(C_{исх} - C_{равн})}{m} \cdot V,$$

где:  $A$  – емкость сорбента, мг/г;  $C_{исх}$  и  $C_{равн}$  – исходная и равновесная (остаточная) концентрации ионов металлов в растворе соответственно, мг/л;  $V$  – объем раствора, л;  $m$  – масса сорбента, г.

Степень извлечения ионов металлов ( $E$ , %) рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{(C_{исх} - C_{равн})}{C_0} \cdot 100\%,$$

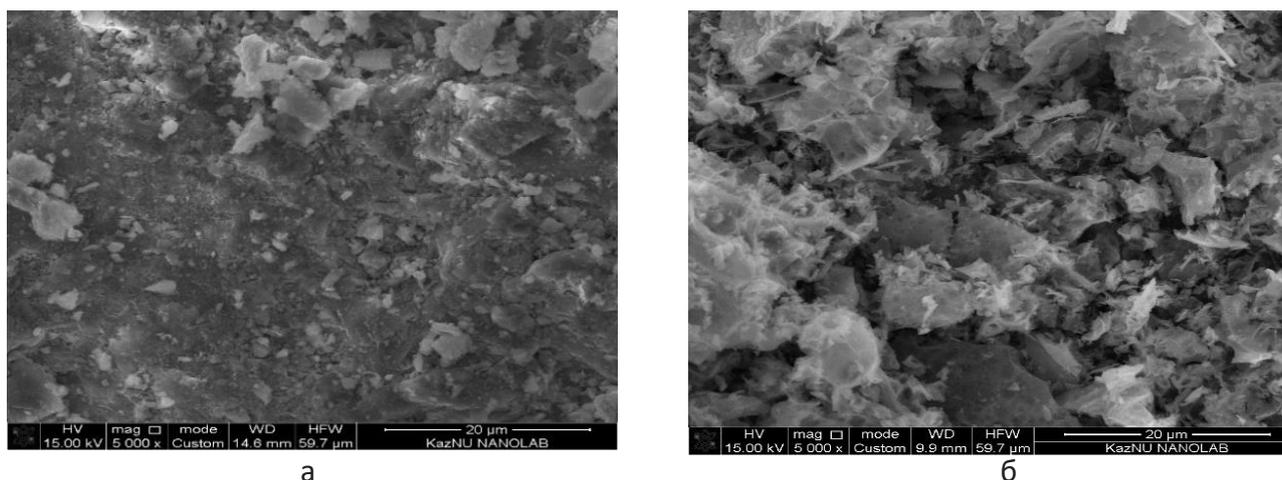
где:  $C_{исх}$  – исходная концентрация иона металла в растворе, мг/л;  $C_{равн}$  – равновесная (остаточная) концентрация иона металла в растворе, мг/л.

## 3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены микрофотографии исходного и модифицированного хитозаном природного цеолита, полученные методом сканирующей электронной микроскопии. Морфология исходного цеолита представлена плотными образованиями с прочными агломератами и частицами неправильной формы различных размеров. В результате физико-механических воздействий на цеолит (измельчение) и модифицирования полимером (хитозаном) происходит изменение поверхностной структуры материала (рисунок 1-б). В структуре образца после модифицирования наблюдается укрупнение агломератов неправильной формы и расширение пор. Таким образом, можно предположить, что добавление полимера оказывает значительное влияние на пористую структуру алюмосиликатов.

В таблице 1 представлен химический состав исходного цеолита и его модифицированного аналога, определенный методом сканирующей электронной микроскопии.

Важным фактором в исследовании структуры цеолитов выступает соотношение  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ . Известно, что максимальным поглотительным эффектом обладают высококремнистые цеолиты (с большой величиной отношения  $Si/Al$ ), характеризующиеся высокой пористостью и большим диаметром входных окон. Для



**Рисунок 1** – Электронные фотографии поверхностей: а – исходного цеолита; б – цеолита, модифицированного хитозаном (ЦМХ)

**Таблица 1** – Химический состав природного и модифицированного сорбента

Сырье	Содержание, %							
	Fe	Ca	K	Si	Cu	Mn	Zn	Al
Цеолит	48±4	7,7±0,8	2,04±0,18	23±2	0,8±0,1	0,39±0,02	0,19±0,02	13,9±1,7
ЦМХ	344	10,01,2	6,00,6	31,63,4	0,430,04	0,390,02	0,200,02	14,81,2

природных цеолитов значение данного отношения варьируется от 2 до 10. Согласно данным, представленным в таблице 1, соотношение кремния и алюминия для исходного цеолита составляет 1,66, а для ЦМХ (цеолит модифицированный хитозаном) – 2,14. Следовательно, результаты элементного анализа также подтверждают наличие изменений, происходящих после модифицирования. Как известно, хитозан – природный поликатион, а цеолиты обладают высокой ионообменной способностью. Изменение соотношения Si/Al возможно связано с ионообменными процессами, происходящими в результате взаимодействия катионов хитозана и металлов, находящихся на поверхности цеолита, тем самым изменяя процентное соотношение компонентов.

Сорбция ионов тяжелых металлов природными цеолитами, модифицированными полимерами, представляет собой сложный процесс, на который влияет целый ряд факторов. К возможным механизмам, по которым проходит этот процесс, относят хемосорбцию, комплексообразование, адсорбцию на поверхности и в порах сорбента, сопровождаемую комплексообразованием, ионный обмен, микроосаждение и осаждение гидроксидов тяжелых металлов. Наиболее предпочтительным подходом к исследованию механизма адсорбции является изучение изотерм. Изотермы сорбции показывают, распределение ионов металла между адсорбентом и

жидкой фазой при равновесии в зависимости от концентрации. Исследование данных изотерм позволяет сделать выводы о характере поверхности сорбента, о природе взаимодействия сорбат-сорбент и др. Так, для определения параметров, характеризующих сорбционные свойства модифицированного цеолита, были получены изотермы сорбции ионов свинца и кадмия из водных растворов.

На рисунке 2 представлены изотермы адсорбции ионов Pb(II) и Cd(II) цеолитом, модифицированным хитозаном. Согласно классификации, предложенной Брунауэром, Эмметом и Теллером (классификация БЭТ), полученные изотермы можно отнести к изотермам типа IV. Данный тип изотерм характерен для адсорбции на мезопористых твердых материалах. Процесс протекает по механизму полимолекулярной адсорбции. На изотермах можно условно выделить два участка (I и II). На первом участке кривой наблюдается линейное возрастание адсорбции, в процессе которого идет образование монослоя сорбата на поверхности сорбента и заполнение микропор. Почти горизонтальный участок, соответствующий более высоким концентрациям, отвечает поверхности сорбента, полностью насыщенной сорбатом. В этих условиях, если на поверхности сорбента может образовываться лишь мономолекулярный слой сорбата, количество сорбированного вещества практически перестает

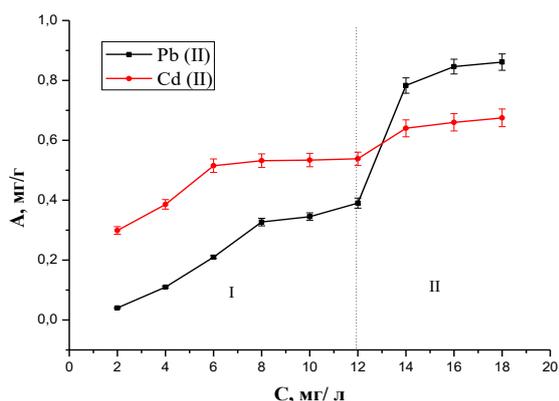


Рисунок 2 – Изотермы сорбции ионов  $Pb^{2+}$  и  $Cd^{2+}$  ЦМХ

зависеть от концентрации. Увеличение величины адсорбции с ростом концентрации на участке II обусловлено заполнением мезопор и образованием последующих адсорбционных слоев. На первом участке изотермы более высокие значения адсорбции ионов кадмия, однако, на втором участке наблюдается резкое увеличение адсорбции свинца. Сорбционная способность веществ зависит от радиуса иона и плотности заряда [17]. Из двух ионов одинакового заряда лучше сорбируются ионы большего радиуса, так как они сильнее поляризованы и лучше притягиваются заряженной поверхностью сорбента, а ионы меньшего радиуса более склонны к гидратации и формированию гидратной оболочки, снижающей такое электростатическое взаимодействие. Радиус иона свинца составляет 0,112 нм, а иона кадмия – 0,099 нм, следовательно, сорбционная емкость сорбента по отношению к ионам свинца должна быть выше, чем по отношению к ионам кадмия. Также следует учесть геометрический фактор, оказывающий влияние на

физическую адсорбцию. При заполнении мезопор лучшее «удерживание» происходит для иона большего размера, в данном случае – свинца.

Согласно полученным изотермам сорбции статистические обменные емкости (СОЕ) составляют  $(0,86 \pm 0,03)$  мг/г для свинца и  $(0,68 \pm 0,03)$  мг/г для кадмия.

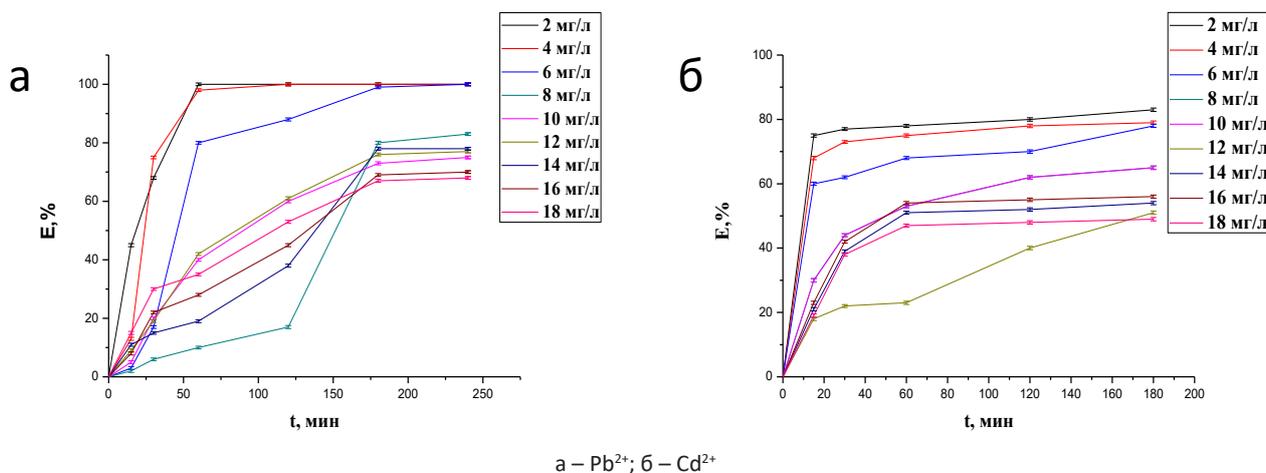
Полученные результаты можно расценивать как доказательство сложного механизма сорбции:

1. поверхность сорбента неоднородна, характеризуется наличием активных центров различной природы, вследствие чего имеют место различные межмолекулярные взаимодействия компонентов в адсорбционном слое;
2. линейные участки изотерм, очевидно, свидетельствует о сильной адсорбции адсорбтива и о присутствии мезопор, а также о сильном межмолекулярном взаимодействии в матрице природного материала;
3. адсорбция многослойна.

Как известно, продолжительность контакта с водной фазой, содержащей ионы извлекаемого металла, влияет на степень извлечения ионов металлов. На рисунке 3 представлены графики зависимости степени извлечения ионов свинца и кадмия сорбентом ЦМХ от времени сорбции.

Результаты исследований, представленные на рисунке 3, показывают, что с ростом длительности контакта модифицированного сорбента (ЦМХ) с водной фазой, содержащей ионы металлов, степень их извлечения на начальном этапе повышается, далее становится практически постоянной. Период насыщения сорбента зависит от природы иона металла. Как видно из предоставленных графиков, сорбционное равновесие при извлечении ионов кадмия наступает в течение 20 мин, а для ионов свинца – 180 мин.

Степень извлечения ионов свинца –  $(99,1 \pm 1,2)\%$ , для ионов кадмия –  $(83,4 \pm 1,2)\%$ .



а –  $Pb^{2+}$ ; б –  $Cd^{2+}$

Рисунок 3 – Зависимость степени извлечения ионов тяжелых металлов модифицированным сорбентом от времени сорбции

#### 4. Заключение

Получен сорбент на основе цеолита Чанканайского месторождения и хитозана в статических условиях при  $T=295\pm 2$  К и  $pH=7$ . Исследование морфологии поверхности модифицированного сорбента на основе хитозана показало наличие ассиметричных пор и открытой пористой структуры. Установлено, что модифицированный хитозаном цеолит является эффективным при извлечении ионов свинца и кадмия [18-19]. Модифицированный цеолит при стандартных условиях извлекает ионы кадмия на  $(83,4\pm 1,2)\%$ , а свинца на  $(99,1\pm 1,2)\%$ . Рассчитаны статичес-

кие обменные ёмкости данного сорбента по ионам свинца и кадмия, которые равны  $(0,86\pm 0,03)$  мг/г и  $(0,68\pm 0,03)$  мг/г соответственно.

#### Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Министерства Образования и науки Республики Казахстан: проект 3444/ГФ4 «Разработка научных основ фосфорсодержащих соединений на основе техногенного минерального сырья» и грант «Лучший преподаватель ВУЗа 2017» проф. Сейлхановой Г.А.

#### Список литературы

- 1 Габрук Н.Г., Олейникова И.И., Метелев А.В., Давиденко А.В., Хуинь Тхи Тхуи Чанг. ИК-спектроскопия в изучении состава композитов, полученных из растительного и животного сырья // Научные ведомости БелГУ, серия Естественные науки. – 2011. – Т.16, №15(110). – С.95-98.
- 2 Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment // Chemical Engineering Journal. – 2010. – Vol.156, Is.1. – P.11-24.
- 3 Крючин А.А., Косско И.А., Фирстов С.А., Хижун О.Ю. О синергетическом феномене наноструктурного композита краситель-цеолит // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – Т.12, Вып.2. – С.52-61.
- 4 Нагорных Е.А., Мартемьянов Д.В., Слядников П.Е. Модифицирование цеолитов с целью придания дополнительных сорбционных свойств при очистке воды // Материалы XI Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск, 2014.
- 5 Марченкова Т.Г., Кунилова И.В. Исследование сорбции меди, никеля, цинка и серебра на модифицированном Сибайском цеолите // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. – Вып.21. – С.298-301.
- 6 Kragović M., Daković A., Sekulić Z., Trgo M., Ugrina M., Perić J., Gatta G.D. Removal of lead from aqueous solutions by using the natural and Fe(III)-modified zeolite // Applied Surface Science. – 2012. – Vol.258, Is.8. – P.3667-3673.
- 7 Chauhan S. Modification of chitosan for sorption of metal ions // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. – 2015. – Vol.7, Is.4. – P.49-55.
- 8 Rinaudo M. Chitin and chitosan: properties and applications // Progress in polymer science. – 2006. – Vol.31, Is.7. – P.603-632.
- 9 Wan Ngah W.S., Teong L.C., Hanafiah M.A.K.M. Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites // Carbohydrate Polymers. – 2011. – Vol.83, Is.4. – P.1446-1456.
- 10 Chang M.-Y., Juang R.-S. Adsorption of tannic acid, humic acid, and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay // Journal of Colloid and Interface Science. – 2004. – Vol.278, Is.1. – P.18-25.
- 11 Kalyani S., Ajitha Priyaa J., Srinivasa Rao P., Krishnaiah A. Removal of copper and nickel from aqueous solutions using chitosan coated on perlite as biosorbent // Separation Science and Technology. – 2005. – Vol.40, Is.7. – P.1483-1495.
- 12 Amer M.W., Khalili F.I., Awwad A.M. Adsorption of lead, zinc and cadmium ions on polyphosphate-modified kaolinite clay // Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology. – 2010. – Vol.2, Is.1. – P.001-008.
- 13 Kamar F.H., Nechifor A.C., Mohammed A.A., Albu P.C., Craciun M.E. Removal of lead and cadmium ions from aqueous solutions using walnut shells as low-cost adsorbent materials // Revista de Chimie. – 2015. – Vol.66, Is.5. – P.615-620.
- 14 El-Moselhy K.M., Azzem M.A., Amer A., Al-Proh A.E. Adsorption of Cu (II) and Cd (II) from aqueous solution by using rice husk adsorbent // Physical Chemistry: An Indian Journal. – 2017. – Vol.12, Is.2. – P.1-13.
- 15 Костин А.В., Мосталыгина Л.В., Бухтояров О.И. Изучение механизма сорбции ионов меди и свинца на бентонитовой глине // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2012. – Т.12, Вып.6. – С.949-957.
- 16 Morpoung R., Kenghetkit N. Lead and cadmium removal efficiency from aqueous solution by NaOH treated pineapple waste // International Journal of Applied Chemistry. – 2016. – Vol.12, Is.1. – P.23-36.
- 17 Амерханова Ш.К., Уали А.С., Байлен А.С. Электросорбционное концентрирование ионов  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  из растворов // Вестник Омского Университета. – 2016. – Вып.2. – С.32-36.
- 18 Адрышев А.К., Струнникова Н.А., Карибаева М.К. Извлечение ионов металлов из загрязненных подземных вод цеолитами // Вестник ВКГУ. Серия Экология. – 2008. – №2. – С.102-108.
- 19 Васильянова Л.С., Лазарева Е.А. Цеолиты в экологии // Новости науки Казахстана. Серия Химия. – 2016. – №1(127). – С.61-85.

## References

- 1 Gabruk NG, Oleynikova II, Metelev AV, Davidenko AV, Huin Thi Thui Chang (2011) Scientific bulletins of Belgorod State University [Nauchnye vedomosti Belgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta] 16:95-98. (In Russian)
- 2 Wang S, Peng Y (2010) Chem Eng J 156:11-24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
- 3 Kryuchin AA, Kosko IA, Firstov SA, Hizhun OYu (2010) Data Recording, Storage and Processing [Registratsiya, hranenie i obrabotka dannykh] 12:52-61. (In Russian)
- 4 Nagornyykh EA, Martemyanov DV, Slyadnikov PE (2014) Modification of zeolites with the purpose of giving additional sorption properties for water purification [Modifitsirovanie tseolitov s tselyu pridaniya dopolnitelnykh sorbtsionnykh svoystv pri ochistke vody]. Materials of XI International students and young scientists conference "Prospects for the development of fundamental sciences", Tomsk, Russia. (In Russian)
- 5 Marchenkova TG, Kunilova IV (2004) Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal) [Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) 21:298-301. (In Russian)
- 6 Kragović M, Daković A, Sekulić Ž, Trgo M, Ugrina M, Perić J, Gatta GD (2012) Appl Surf Sci 258:3667-3673. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.12.002>
- 7 Chauhan S (2015) J Chem Pharm Res 7:49-55.
- 8 Rinaudo M (2006) Prog Polym Sci 31:603-632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- 9 Wan Ngah WS, Teong LC, Hanafiah MAKM (2011) Carbohyd Polym 83:1446-1456. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.11.004>
- 10 Chang MY, Juang RS (2004) J Colloid Interf Sci 278:18-25. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.05.029>
- 11 Kalyani S, Ajitha Priyaa J, Srinivasa Rao P, Krishnaiah A (2005) Sep Sci Technol 40:1483-1495. <https://doi.org/10.1081/SS-200055940>
- 12 Amer MW, Khalili FI, Awwad AM (2010) Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology 2:001-008.
- 13 Kamar FH, Nechifor AC, Mohammed AA, Albu PC, Craciun ME (2015) Rev Chim-Bucharest 66:615-620.
- 14 El-Moselhy KM, Azzem MA, Amer A, Al-Prol AE (2017) Physical Chemistry: An Indian Journal 12:1-13.
- 15 Kostin AV, Mostalygina LV, Bukhtoyarov OI (2012) Sorption and Chromatographic processes [Sorbtsionnye i khromatograficheskiye processy] 12:949-957. (In Russian)
- 16 Mopoung R, Kenghetkit N (2016) International Journal of Applied Chemistry 12:23-36.
- 17 Amerkhanova ShK, Uali AS, Bailen AS (2016) Bulletin of Omsk University [Vestnik Omskogo Universiteta] 2:32-36. (In Russian)
- 18 Adryshev AK, Strunnikova NA, Karibayeva MK (2008) Bulletin of East Kazakhstan State University. Series Ecology [Vestnik VKGU. Seriya Ekologiya] 2:102-108. (In Russian)
- 19 Vasilyanova LS, Lazareva EA (2016) The News of Kazakhstan Science. Series Chemistry [Novosti nauki Kazahstana. Seriya Khimiya] 1(127):61-65.