

## INFLUENCE OF IONIC RADIUS ON THE DEGREE OF EXTRACTION OF RARE EARTH METALS DURING SORPTION BY THE INTERPOLYMER SYSTEM AMBERLITE IR-120 – AB-17-8

T.K. Jumadilov<sup>1</sup>, Kh. Khimersen<sup>1\*</sup>, A.M. Imangazy<sup>1</sup>, J. Haponiuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland

\*E-mail: [hvana88@mail.ru](mailto:hvana88@mail.ru)

**Abstract.** *Introduction.* Studies have been carried out on the sorption of rare earth metal ions in solution using the interpolymer system Amberlite IR-120:AB-17-8. The purpose of the work is to search for conditions for maximum sorption of rare earth elements (Dy, Tb, Gd, Eu and Sm) from aqueous solutions using the effect of remote interaction of ion exchange resins. *Methodology.* The residual concentrations of rare earth ions were determined using an Optima 8300DV Duo inductively coupled plasma spectrometer. *Results.* The best sorption characteristics were determined by the interpolymer system at a ratio of 3:3. The residual concentration of rare earth elements in the solution was: Dy – 4.64 mg/l, Tb – 4.16 mg/l, Gd – 4.21 mg/l, Eu – 4.16 mg/l, Sm – 4.56 mg/l. The variations in the ionic radius of the ions chosen for the study are  $Dy^{3+} < Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+} < Sm^{3+}$ . The degree of sorption of interpolymer system increased with increasing ionic radius of the metals. For dysprosium with the smallest ionic radius, the degree of sorption was  $\eta$  – 52%, and for terbium, gadolinium and europium it increased to  $\eta$  – 58%. For individual Amberlite IR-120 (6:0), the degree of sorption of terbium ions was 47%. *Conclusion.* The results of the study showed that the interpolymer system with a ratio of 3:3 has the best sorption activity. It has been established that the degree of sorption of interpolymer pairs increases with increasing order of the ionic radius of metals ( $Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+}$ ).

**Keywords:** interpolymer system, Amberlite IR-120, AB-17-8, remote interaction, mutual activation, rare earth ions, extraction degree.

---

*Jumadilov Talkybek Kozhatayevich* Doctor of Chemical Sciences, Professor, e-mail:

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

---

*Khimersen Khuangul*

PhD student, e-mail: [hvana88@mail.ru](mailto:hvana88@mail.ru)

---

*Imangazy Aldan Maratuly*

Scientific Researcher, e-mail: [kazpetrochem@gmail.com](mailto:kazpetrochem@gmail.com)

---

*Jozef Haponiuk*

Full professor, e-mail: [jozef.haponiuk@pg.edu.pl](mailto:jozef.haponiuk@pg.edu.pl)

---

**Citation:** Jumadilov T.K., Khimersen Kh., Imangazy A.M., Haponiuk J. Influence of ionic radius on the degree of extraction of rare earth metals during sorption by the interpolymer system AMBERLITE IR-120 – AB-17-8. *Chem. J. Kaz.*, **2024**, 1(85), 48-57. (In Kaz.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2024-1.2710-1185.05>

## АМБЕРЛИТ IR-120 – АВ-17-8 ИНТЕРПОЛИМЕР ЖҮЙЕСІМЕН СІРЕК ЖЕР МЕТАЛДАРЫН СОРБЦИЯЛАУ КЕЗІНДЕ СОРУ ДӘРЕЖЕСІНЕ ИОНДЫҚ РАДИУСТЫҢ ӘСЕРІ

Т.К. Джумадилов<sup>1</sup>, Х. Химэрсэн<sup>1\*</sup>, А.М. Имангазы<sup>1</sup>, Ю. Хапонюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Гданьск технологиялық университеті, Польша

\*E-mail: huana88@mail.ru

**Түйіндеме.** *Kіріспе.* Amberlite IR-120:AB-17-8 интерполимер жүйесі арқылы ерітіндідегі СЖМ иондарының сорбциясына зерттеу жүргізілді. *Жұмыстың мақсаты* ионалмастырғыш шайырлардың қашықтықтан әрекеттесу эффектісін пайдалана отырып, су ерітінділерінен сирек жер элементтерін (Dy, Tb, Gd, Eu және Sm) максималды сұрыптау шарттарын іздеу. *Әдістері.* Сорбциядан кейін СЖМ иондарының қалдық концентрациялары Optima 8300DV Duo индуктивті байланысқан плазмалық оптикалық эмиссия спектрометрінің көмегімен анықталды. *Алынған нәтижелер.* Интерполимерлі жүйелердің 3:3 қатынасында ең жақсы сорбция мәндері анықталды. Ерітіндідегі қалдық концентрация Dy үшін 4.64 мг/л, Tb үшін 4.16 мг/л, Gd үшін 4.21 мг/л, Eu үшін 4.16 мг/л және Sm үшін 4.56 мг/л. Бұл зерттеуге таңдалып алынған иондардың иондық радиусының өзгерістері  $Dy^{3+} < Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+} < Sm^{3+}$ . Интерполимерлі жұптардың сорбция дәрежесі металдардың иондық радиусының өсу ретіне қарай артқан. Иондық радиусы ең кішкентай диспрозий үшін η-52%, ал келесі тербий, гадолиний және европий үшін η-58% дейін көтерілген. Жеке Amberlite IR-120 (6:0) үшін тербий иондарына қатысты сорбция дәрежесі 47%. *Қорытынды.* Зерттеу нәтижесінде интерполимерлі жүйелердің 3:3 қатынасында ең жақсы сорбция мәндері анықталды. Интерполимерлі жұптардың сорбция дәрежесі металдардың иондық радиусының өсу ретіне қарай ( $Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+}$ ) артатыны белгілі болды.

**Түйін сөздер:** интерполимерлі жүйе, Amberlite IR-120, АВ-17-8, қашықтан әрекеттесу, өзара активтену, СЖМ иондары, сорбция дәрежесі

<i>Джумадилов Талқыбек Қожатаевич</i>	<i>Химия ғылымдарының докторы, профессор</i>
<i>Химэрсэн Хуангүл</i>	<i>PhD докторант</i>
<i>Имангазы Алдан Маратұлы</i>	<i>Ғылыми қызметкер</i>
<i>Юзеф Хапонюк</i>	<i>Профессор</i>

### 1. Кіріспе

Сирек жер металдары технологияның әр түрлі салаларында кеңінен қолданылып жатқан элементтер. Атап айтсақ неодим (Nd), празеодим (Pr) және диспрозия (Dy) жел турбиналарында тұрақты магниттер үшін, лантан (La) және церий (Ce) электр көліктеріндегі аккумуляторлар үшін пайдаланылады. Жел энергиясы мен электр көліктерін пайдаланудың өсуі қазіргі уақытта СЖЭ-не сұранысты арттырды [1]. Сирек жер элементтері жер қыртысында басқа қолданылып жүрген элементтерге қарағанда салыстырмалы түрде көп, бірақ жеткілікті түрде шоғырланбаған. СЖЭ-нің иондық радиустарының жақындығы, үш валентті тотығу күйі және төмен поляризациялық сияқты химиялық ұқсастықтарына байланысты оларды бөлу және тазалауда бірқатар қиындықтар бар [2, 3]. СЖЭ тазарту үшін еріткішпен және көмірқышқыл газымен экстракциялау, ион алмасу, фракциялық тұндыру сияқты бірнеше әдістер қолданылады [4, 5].

Металдарды технологиялық ерітінділерден бөлуге арналған көптеген полимерлік сорбенттер синтезделіп сынақтан өткеніне қарамастан СЖЭ өндірісте су ерітінділерінен бөлетін иониттер өте аз [3,6,7]. Зерттеудің мақсаты ионалмастырғыш шайырлардың қашықтықтан әрекеттесу эффектісін пайдалана отырып, су ерітінділерінен сирек жер элементтерін (Dy, Tb, Gd, Eu және Sm) максималды сұрыптау шарттарын іздеу [8]. Бұл элементтер иондық радиусы және периодтық жүйедегі реттік нөмірі бойынша СЖМ ортасында орналасқан [9]. Бұлардың ішінде ең сирек кездесетіні және қымбаты европий.

Европий (Eu) люминесцентті лампалар мен теледидар экрандарында басқа сирек жер элементтерімен бірге, ашық және қанық түстер алу үшін қолданылатын люминофор өндірісіндегі негізгі компонент болып табылады [10]. Сондай-ақ, ядролық реакторларда ядролық реакциялардың жылдамдығын реттеу үшін қолданылады [8]. Медицинада еуропий магниттік қасиетіне байланысты магнитті-резонансты томография (МРТ) және компьютерлік томография (КТ) үшін контраст агенті ретінде қолданылуы мүмкін [11]. Диспрозий (Dy) ауыр сирек жер металдарының қатарына жатады. Сирек жер металдарының арасында «магниттердің патшасы» ретінде белгілі. Тұрақты магниттерді (Nd-Fe-B типті) өндіруде және олардың жоғары температураға және магнитсізденуге төзімділігін жақсартуда қолданылады. Бұл тұрақты магниттер жел турбиналары, электр машиналары және компьютердің қатты дискілерін құрайды. Диспрозий таза энергияны дамытуда және жоғары технологиялық электроника өнеркәсібінде маңызды рөл атқарады [12].

Тербий (Tb) электронды, магниттік және оптикалық қасиеттеріне байланысты маңызды сирек жер элементі болып табылады. Шыны өнеркәсібінде, полимерлерде, биохимиялық сенсорларда және күн батареяларында қолданылады [13].

Гадолиний (Gd) ерекше металлургиялық қасиетке ие. 1% гадолиний темірдің, хромның және онымен байланысты қорытпалардың өңдеуге қабілеттілігін және жоғары температурада тотығуға төзімділігін айтарлықтай жақсарты алады. Металл немесе тұз түріндегі гадолинийдің нейтронды сіңіру қабілеті өте жоғары, сондықтан нейтронды радиографияда және ядролық реакторларда қолданылады [14-15].

Самарий (Sm) оптикалық шыны өндірісінде, керамикалық композицияларды өзгертуде, самарий-кобальт магниттерінде, сондай-ақ нейтронды сіңіргіш ретінде кеңінен қолданылады [16].

Өнеркәсіпте СЖМ қолданудың салдары топырақ қабаттарының, ағынды сулардың, әртүрлі су экожүйелерінің ластануын тудыруда. Дүние жүзінде СЖМ байланысты өндірістерден жыл сайын сирек жер элементтерінің иондары бар 360 миллион тоннадан астам ағынды сулар түзіледі [17]. Сондықтан ағынды сулардың қажетті концентрациясы мен элементтік құрамын қамтамасыз ету үшін қоршаған ортаға тастар алдында

ластанған судан СЖМ жою, сонымен қатар алынған СЖМ иондарын қайта өңдеу өте маңызды.

## 2. Тәжірибелік бөлім

*Зерттеуге келесі материалдар пайдаланылды:* (1) Amberlite IR 120 (H<sup>+</sup> формасы) (Saint-Louis, MO, АҚШ), сульфондалған полистирол негізіндегі күшті қышқылды катионалмастырғыш шайыр және (2) АВ-17-8 (OH<sup>-</sup> формасы) (Азот, Черкассы, Украина), күшті негіздік анионалмастырғыш (стирол және дивинилбензол сополимері).

*Келесі реагенттер пайдаланылды:* ерітіндідегі СЖЭ иондарының көзі ретінде самарий (III) нитраты гексагидраты; европий (III) нитраты пентагидраты; гадолиний (III) нитраты гексагидраты; тербий (III) нитраты пентагидраты; диспрозий (III) нитраты (х)гидраты. Реагенттер Sigma-Oldrich компаниясынан алынды. Тұз ерітінділерінің қоспасы дистилденген сумен дайындалды.

*Келесі құрал-жабдықтар пайдаланылды:* Optima 8300DV Duo индуктивті байланысқан плазмалық-оптикалық эмиссия спектрометрі (ICP-OES) (PerkinElmer, Waltham, MA, АҚШ) толқын ұзындығы 165–782 нм диапазонында СЖЭ ерітіндідегі қалдық иондарын анықтау үшін пайдаланылды.

*Интерполимерлік жүйелердің сорбциялық қасиеттерін зерттеу:*

1) Өндірістік ион алмастырғыш шайырлар (Amberlite IR 120, АВ-17-8) негізінде мольдік қатынастары әртүрлі интерполимерлі жүйелер құрылды: Amberlite IR 120 -АВ-17-8;

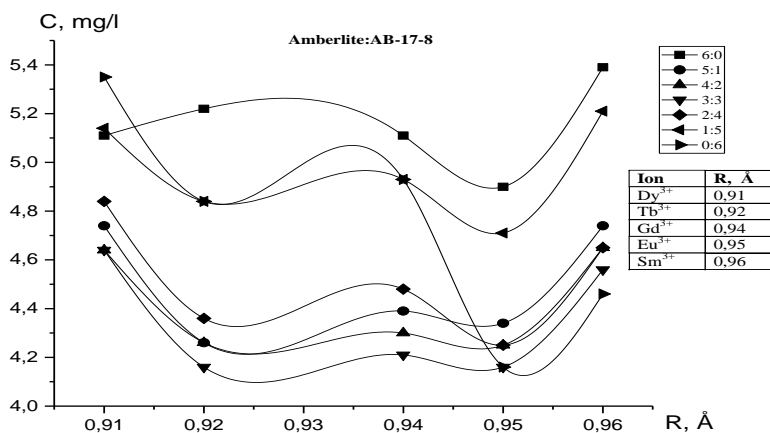
2) Тәжірибелер үшін 1400 мл, жиынтық концентрациясы  $C = 50$  мг/л СЖМ тұз ерітінділерінің қоспасы 7 стаканға (әрқайсысы 200 мл) құйылды. Қоспадағы әр металдың концентрациясы 10 мг/л. Amberlite IR 120 және АВ-17-8 иониттері Х:У молярлық қатынасына сәйкес 2 полипропилен сүзгіге бөлек салынды. Иониттер салынған полипропилен сүзгілер ерітіндіге бір-бірінен 2 см ара қашықтықта орналастырылды. Атомды эмиссионды спектрометрде (ICP-OES) талдау үшін әрбір ерітіндіден 48-сағат өткеннен кейін аликвоттар алынды.

## 3. Нәтижелер және оларды талқылау

*3.1 Amberlite IR-120 -АВ-17-8 интерполимер жүйесі арқылы Sm, Eu, Gd, Tb, Dy иондарын сорбциялау*

Интерполимерлі жүйелерде болатын әрекеттесулерді тереңірек түсіну үшін Amberlite IR-120 және АВ-17-8 негізіндегі интерполимер жүйесі арқылы ерітіндідегі СЖМ иондарының сорбциясына зерттеу жүргізілді. 1-суретте интерполимерлі жүйелердің әртүрлі молярлық қатынастарында сорбцияланған СЖМ иондарының иондық радиустарына байланысты концентрациясының өзгерісі көрсетілген. Сорбция ұзақтығы – 48 сағат. Интерполимерлі жүйелердің 3:3 қатынасында ең жақсы сорбция мәндері анықталды. Ерітіндідегі қалдық концентрация Dy үшін 4.64 мг/л, Tb үшін

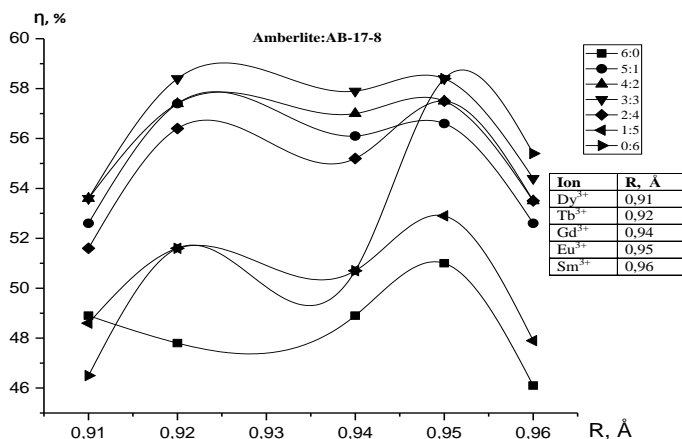
4.16 мг/л, Gd үшін 4.21 мг/л, Eu үшін 4.16 мг/л және Sm үшін 4.56 мг/л. Ионалмастырғыштардың сорбциялық қабілетін құрамындағы функционалдық топтардың табиғатымен түсіндіруге болады. Функционалдық топтардың ион алмасуы металл ионының атомдық нөміріне, валенттілігіне және иондану дәрежесіне қарай артады [19]. Бұл зерттеуге таңдалып алынған иондардың иондық радиусының өзгерістері  $Dy^{3+} < Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+} < Sm^{3+}$ . Зарядтың тығыздығы жоғары шағын иондар күштірек байланысады. Заряд тығыздығының төмендеуіне байланысты иондық радиус ұлғайған сайын ( $Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+}$ ) Amberlite IR-120 -AB-17-8 интерполимер жүйесімен ион алмасу қабілеті артады. Тербий, гадолиний және европий иондарының сорбциялық (байланыстыру) мәндері басқа металл иондарымен салыстырғанда (самарий мен диспрозий) жоғары болды.



Сурет 1 - Amberlite IR-120 -AB-17-8 интерполимер жүйесінің әртүрлі мольдік қатынасында металл иондарының иондық радиусына [9] байланысты сорбциядан кейінгі қалдық концентрацияның өзгеруі.

Шайыр фазасындағы металл иондарының диффузия жылдамдығына гидратталған ионның радиусы, оның заряды және қозғалғыштығы сияқты факторлар әсер етеді. Атап айтқанда, иондардың сорбентке жақындығы кристаллографиялық өлшемнің азаюына, зарядтың ұлғаюына және соның салдарынан гидратталған ионның радиусының ұлғаюына сәйкес төмендейді. Сондай-ақ температура және алмасу орталықтарының иондық түрі де реакция жылдамдығына әсер етеді. Электростатикалық әсерлердің әсерінен гидратталған металл ионының радиусы азайған сайын және металл ионының заряды ұлғайған сайын металл байланысының беріктігі артады. Әртүрлі қатынастағы интерполимерлі жүйелер салыстырмалы концентрациялары бірдей бес металл иондары бар ерітіндіге батырылды. Егер Amberlite IR-120-AB-17-8 интерполимер жүйесі металл иондарының

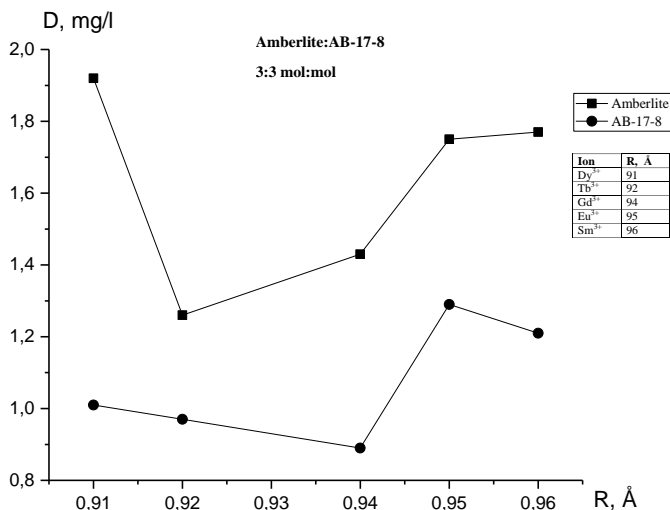
біріне артықшылық берсе, онда оның сорбция дәрежесі басқаларына қарағанда жоғары болады. Яғни бұл интерполимерлі жүйенің сол ионға салыстырмалы жақындығын көрсетеді. 2-суретте Amberlite IR-120 -AB-17-8 интерполимер жүйесінің әртүрлі мольдік қатынасында металл иондарының иондық радиусына байланысты сорбция дәрежесінің өзгерісі көрсетілген. Жеке ионалмастырғыштар Amberlite IR-120 және AB-17-8 сорбция дәрежесі интерполимерлі жұптармен салыстырғанда әлдеқайда төмен. Ал 3:3, 5:1, 4:2 қатынастарындағы полимер жұптары максималды сорбция дәрежесіне ие. Интерполимерлі жұптардың сорбция дәрежесі металдардың иондық радиусының өсу ретіне қарай артқан. Мысалға иондық радиусы ең кішкентай диспрозий үшін  $\eta$ -52%, ал келесі тербий, гадолиний және европий үшін  $\eta$ -58% дейін көтерілген. Жеке Amberlite IR-120 (6:0) үшін тербий иондарына қатысты сорбция дәрежесі 47%.



Сурет 2 - Amberlite IR-120 -AB-17-8 интерполимер жүйесінің әртүрлі мольдік қатынасында металл иондарының иондық радиусына [9] байланысты сорбция дәрежесінің өзгеруі.

### 3.2 «Amberlite IR-120 -AB-17-8» интерполимер жүйесінен СЖМ десорбциялау

Ион алмастырғыштағы металл иондарының қоспасының десорбциялық зерттеулері полимерлерді 2% HNO<sub>3</sub> элюент ерітіндісінде, бөлме температурасында 72 сағат бойы араластыру арқылы орындалды. Металл иондарының концентрациясы ICP-OES спектрометрінде анықталды. Алынған нәтижелер 3-суретте берілген. Амберлит IR-120 ион алмастырғыш шайырының ең үлкен мәні 1.92 мг/л (Dy), ал ең кіші мәні 1.26 мг/л (Tb). Анион алмастырғыштың десорбция сызығы катионитпен салыстырғанда төменде жатыр. Мұнда европий иондарының ерітіндіге шыққан максимум мәні 1.29 мг/л, ал ең аз десорбцияланған гадолиний иондары, небәрі 0.89 мг/л.



Сурет 3 - Amberlite IR-120 -AB-17-8 интерполимер жүйесінен (3:3 моль/моль) металл иондарын десорбциялау

#### 4. Қорытынды

Металдарды технологиялық ерітінділерден бөлуге арналған көптеген полимерлік сорбенттер синтезделіп сынақтан өткеніне қарамастан СЖМ өндірісте су ерітінділерінен сұрыптап бөлетін иониттер өте аз. Мақалада ионалмастырғыш шайырлардың қашықтықтан әрекеттесу эффектісін пайдалана отырып, су ерітінділерінен сирек жер элементтерін (Dy, Tb, Gd, Eu және Sm) максималды сұрыптау шарттары қарастырылды. Зерттеу нәтижесінде интерполимерлі жүйелердің 3:3 қатынасында ең жақсы сорбция мәнделері анықталды. Интерполимерлі жұптардың сорбция дәрежесі металдардың иондық радиусының өсу ретіне қарай ( $Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+}$ ) артқан. Мысалға иондық радиусы ең кішкентай диспрозий үшін  $\eta$ -52%, ал келесі тербий, гадолиний және европий үшін  $\eta$ -58% дейін көтерілген. Тербий, гадолиний және европий иондарының сорбция дәрежесі басқа металл иондарымен салыстырғанда (самарий мен диспрозий) жоғары болды.

**Қаржыландыру:** Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыру бойынша BR18574042 жобасымен қаржыландырылды.

**Мүдделер қақтығысы:** Авторлар бұл мақалада өзара мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

## ВЛИЯНИЕ ИОННЫХ РАДИУСОВ НА СТЕПЕНЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ СОРБЦИИ ИНТЕРПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМОЙ АМБЕРЛАЙТ IR-120 – АВ-17-8

Т.К. Джумадилов<sup>1</sup>, Х. Химэрсэн<sup>1</sup>, А.М. Имангазы<sup>1</sup>, Ю. Хапонюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Институт химических наук имени А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Гданьский технологический университет, Гданск, Польша

\*e-mail: huana88@mail.ru

**Резюме.** *Введение.* Проведены исследования по сорбции ионов РЗМ в растворе с использованием интерполимерной системы Amberlite IR-120:AB-17-8. *Цель работы* – поиск условий максимальной сорбции редкоземельных элементов (Dy, Tb, Gd, Eu и Sm) из водных растворов с использованием эффекта дистанционного взаимодействия ионообменных смол. *Методология.* После сорбции остаточные концентрации ионов РЗМ определяли с помощью спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 8300DV Duo. *Полученные результаты.* Наилучшие сорбционные показатели были определены интерполимерной системой при соотношении 3:3. Остаточная концентрация редкоземельных элементов в растворе составила: Dy – 4.64 мг/л, Tb – 4.16 мг/л, Gd – 4.21 мг/л, Eu – 4.16 мг/л, Sm – 4.56 мг/л. Вариации ионного радиуса выбранных для исследования ионов составляют  $Dy^{3+} < Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+} < Sm^{3+}$ . Степень сорбции интерполимерных пар увеличивалась с увеличением ионного радиуса металлов. Для диспрозия с наименьшим ионным радиусом степень сорбции составила  $\eta = 52\%$ , а для тербия, гадолиния и европия она увеличилась до  $\eta = 58\%$ . Для индивидуального Amberlite IR-120 (6:0) степень сорбции ионов тербия составила 47%. *Вывод.* Результаты исследования показали, что наилучшей сорбционной активностью обладает интерполимерная система при соотношении 3:3. Установлено, что степень сорбции интерполимерных пар увеличивается с увеличением порядка ионного радиуса металлов ( $Tb^{3+} < Gd^{3+} < Eu^{3+}$ ).

**Ключевые слова:** интерполимерная система, Amberlite IR-120, АВ-17-8, дистанционное взаимодействие, взаимная активация, ионы РЗМ, степень сорбции

Джумадилов Талкыбек Кожатаевич	Доктор химических наук, профессор
Химэрсэн Хуангул	Ph.D докторант
Имангазы Алдан Маратұлы	Научный сотрудник
Юзеф Хапонюк	Профессор

### Әдебиеттер тізімі

- Lie J., Liu J.C. Selective recovery of rare earth elements (REEs) from spent NiMH batteries by two-stage acid leaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2021**, 9(5). <http://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106084>
- Джумадилов Т.К., Химэрсэн Х., Тотхусқызы Б., Хапонюк Ю. Сирек жер элементтерін бөліп алудың адсорбциялық әдістері. *Комплексное использование минерального сырья*. **2021**, 3 (318), 12-23. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.24>
- Sert S., Altas Y., Tel H., Inan S., Cetinkaya B., Sengul S., Ozkan B. Investigation of sorption behaviors of La, Pr, Nd, Sm, Eu and Gd on D2EHPA-impregnated XAD7 resin in nitric acid medium. *Sep. Scien. and Technol.* **2019**, 1-10. <http://doi.org/10.1080/01496395.2019.1708107>
- Lee G. S., Uchikoshi M., Mimura K., Isshiki M. Separation of Major Impurities Ce, Pr, Nd, Sm, Al, Ca, Fe, and Zn from La Using Bis(2-ethylhexyl)phosphoric Acid (D2ehpa)-impregnated Resin in a Hydrochloric Acid Medium. *Sep. Purif. Technol.* **2010**, 71, 186–191. <http://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.11.020>
- De Vasconcellos M. E., Queiroz C. A. D. S., Abrao A. Sequential Separation of the Yttrium - Heavy Rare Earths by Fractional Hydroxide Precipitation. *J. Alloys Compd.* **2004**, 374, 405–407. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.11.038>
- Martin D.M., Jalaff L.D., Garcia M.A., Faccini M. Selective Recovery of Europium and Yttrium Ions with Cyanex 272- Polyacrylonitrile Nanofibers. *Nanomaterials*. **2021**, 9(12), 1648. <http://doi.org/10.3390/nano91216488>



7. Abu Elgoud E.M., Ismail Z.H., Ahmad M.I., El-Nadi Y.A., Abdelwahab S.M., Aly H.F. Sorption of Lanthanum(III) and Neodymium(III) from Concentrated Phosphoric Acid by Strongly Acidic Cation Exchange Resin (SQS-6). *Russ. J. Appl. Chem.* **2019**, 92, 1581–1592. <https://doi.org/10.1134/S1070427219110156>
8. Imangazy A., Jumadilov T., Khimersen K., Bayshibekov A. Enhanced Sorption of Europium and Scandium Ions from Nitrate Solutions by Remotely Activated Ion Exchangers. *Polymers*. **2023**, 15, 1194. <https://doi.org/10.3390/polym15051194>
9. chemistry.ru/course/content/chapter2/section/...
10. Xu H., Sun Q., An Z., Wei Y., Liu X. Electroluminescence from europium (III) complexes. *Coord. Chem. Reviews*. **2015**, 293-294, 228–249. <http://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.02.018>
11. Pagano G., Guida M., Tommasi F., Oral R. Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements—Knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **2015**, 115, 40–48. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.030>
12. Taher A., Somaye A. Synthesis of nano-sized Eu<sup>3+</sup>-imprinted polymer and its application for indirect voltammetric determination of europium. *Talanta*. **2013**, No. 106, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.01.019>
13. Paduraru A.V., Oprea O., Musuc A.M., Vasile B.S., Iordache F., Andronescu E. Influence of Terbium Ions and Their Concentration on the Photoluminescence Properties of Hydroxyapatite for Biomedical Applications. *Nanomaterials*. **2021**, 11, 2442. <https://doi.org/10.3390/nano11092442>
14. El-Sofany E.A. Removal of lanthanum and gadolinium from nitrate medium using Aliquat-336 impregnated onto Amberlite XAD-4. *J. Hazardous Materials*. **2008**, 153(3) 948. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.046>
15. Aghayan H., Khanchi A. R., Mahjoub A. R. Synthesis and characterization of cesium molybdo vanado phosphate immobilized on platelet SBA-15: An efficient inorganic composite ion-exchanger for gadolinium ion sorption. *Applied Surface Science*. **2013**, 274, 7–14. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.005>
16. Mahmoud M. E., Nabil G. M., Elweshahy S. M. T. Novel NTiO<sub>2</sub>-chitosan@NZrO<sub>2</sub>-chitosan nanocomposite for effective adsorptive uptake of trivalent gadolinium and samarium ions from water. *Powder Technology*. **2021**, 378, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.058>
17. Ali I., Babkin A. V., Burakova I. V., Burakov A. E., Neskoronnaya E. A., Tkachev A. G., Alomar T. S. Fast removal of samarium ions in water on highly efficient nanocomposite based graphene oxide modified with polyhydroquinone: Isotherms, kinetics, thermodynamics and desorption. *Journal of Molecular Liquids*. **2021**, 329, 115584. <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115584>
18. Jumadilov T., Totkhuskyzy B., Malimbayeva Z., Kondaurov R., Imangazy A., Khimersen K., Grazulevicius J. Impact of Neodymium and Scandium Ionic Radii on Sorption Dynamics of Amberlite IR120 and AB-17-8 Remote Interaction. *Materials*. **2021**, 14, 5402. <https://doi.org/10.3390/ma14185402>
19. Pehlivan E., Altun T. Ion-exchange of Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Ni<sup>2+</sup> ions from aqueous solution by Lewatit CNP 80. *Journal of Hazardous Materials*. **2007**, 140(1-2), 299–307. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.011>

## References

1. Lie J., Liu J.C. Selective recovery of rare earth elements (REEs) from spent NiMH batteries by two-stage acid leaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2021**, 9(5). <http://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106084>
2. Jumadilov T.K., Khimersen Kh., Totkhuskyzy B., Haponiuk J. Adsorption methods for the extraction and separation of rare earth elements. Review. *Complex Use of Mineral Resources* (In Kazakh). **2021**, 3 (318), 12-23. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.24>
3. Sert S., Altas Y., Tel H., Inan S., Cetinkaya B., Sengul S., Ozkan B. Investigation of sorption behaviors of La, Pr, Nd, Sm, Eu and Gd on D2EHPA-impregnated XAD7 resin in nitric acid medium. *Sep. Scien. and Technol.* **2019**, 1-10. <http://doi.org/10.1080/01496395.2019.1708107>
4. Lee G. S., Uchikoshi M., Mimura K., Isshiki M. Separation of Major Impurities Ce, Pr, Nd, Sm, Al, Ca, Fe, and Zn from La Using Bis(2-ethylhexyl)phosphoric Acid (D2ehpa)-impregnated Resin in a Hydrochloric Acid Medium. *Sep. Purif. Technol.* **2010**, 71, 186–191. <http://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.11.020>
5. De Vasconcellos M. E., Queiroz C. A. D. S., Abrao A. Sequential Separation of the Yttrium - Heavy Rare Earths by Fractional Hydroxide Precipitation. *J. Alloys Compd.* **2004**, 374, 405–407. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.11.038>

6. Martin D.M., Jalaff L.D., Garcia M.A., Faccini M. Selective Recovery of Europium and Yttrium Ions with Cyanex 272- Polyacrylonitrile Nanofibers. *Nanomaterials*. **2021**, 9(12), 1648. <http://doi.org/10.3390/nano91216488>
7. Abu Elgoud E.M., Ismail Z.H., Ahmad M.I., El-Nadi Y.A., Abdelwahab S.M., Aly H.F. Sorption of Lanthanum(III) and Neodymium(III) from Concentrated Phosphoric Acid by Strongly Acidic Cation Exchange Resin (SQS-6). *Russ. J. Appl. Chem.* **2019**, 92, 1581–1592. <https://doi.org/10.1134/S1070427219110156>
8. Imangazy A., Jumadilov T., Khimersen K., Bayshibekov A. Enhanced Sorption of Europium and Scandium Ions from Nitrate Solutions by Remotely Activated Ion Exchangers. *Polymers*. **2023**, 15, 1194. <https://doi.org/10.3390/polym15051194>
9. chemistry.ru/course/content/chapter2/section/...
10. Xu H., Sun Q., An Z., Wei Y., Liu X. Electroluminescence from europium (III) complexes. *Coord. Chem. Reviews*. **2015**, 293-294, 228–249. <http://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.02.018>
11. Pagano G., Guida M., Tommasi F., Oral R. Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements—Knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **2015**, 115, 40–48. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.030>
12. Taher A., Somaye A. Synthesis of nano-sized Eu<sup>3+</sup>-imprinted polymer and its application for indirect voltammetric determination of europium. *Talanta*. **2013**, No. 106, 431-439, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.01.019>.
13. Paduraru A.V., Oprea O., Musuc A.M., Vasile B.S., Iordache F., Andronescu E. Influence of Terbium Ions and Their Concentration on the Photoluminescence Properties of Hydroxyapatite for Biomedical Applications. *Nanomaterials*. **2021**, 11, 2442. <https://doi.org/10.3390/nano11092442>
14. El-Sofany E.A. Removal of lanthanum and gadolinium from nitrate medium using Aliquat-336 impregnated onto Amberlite XAD-4. *J. Hazardous Materials*. **2008**, 153(3) 948. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.046>
15. Aghayan H., Khanchi A. R., Mahjoub A. R. Synthesis and characterization of cesium molybdo vanado phosphate immobilized on platelet SBA-15: An efficient inorganic composite ion-exchanger for gadolinium ion sorption. *Applied Surface Science*. **2013**, 274, 7–14. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.005>
16. Mahmoud M. E., Nabil G. M., Elweshahy S. M. T. Novel NTiO<sub>2</sub>-chitosan@NZrO<sub>2</sub>-chitosan nanocomposite for effective adsorptive uptake of trivalent gadolinium and samarium ions from water. *Powder Technology*. **2021**, 378, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.058>
17. Ali I., Babkin A. V., Burakova I. V., Burakov A. E., Neskormnaya E. A., Tkachev A. G., Alomar T. S. Fast removal of samarium ions in water on highly efficient nanocomposite based graphene oxide modified with polyhydroquinone: Isotherms, kinetics, thermodynamics and desorption. *Journal of Molecular Liquids*. **2021**, 329, 115584. <http://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115584>
18. Jumadilov T., Totkhuskyzy B., Malimbayeva Z., Kondaurov R., Imangazy A., Khimersen K., Grazulevicius J. Impact of Neodymium and Scandium Ionic Radii on Sorption Dynamics of Amberlite IR120 and AB-17-8 Remote Interaction. *Materials*. **2021**, 14, 5402. <https://doi.org/10.3390/ma14185402>
19. Pehlivan E., Altun T. Ion-exchange of Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Ni<sup>2+</sup> ions from aqueous solution by Lewatit CNP 80. *Journal of Hazardous Materials*. **2007**, 140(1-2), 299–307. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.011>