

Мәдениет Азаматұлы Елубай – химия ғылымдарының кандидаты, Жаратылыстану ғылымдары факультетінің деканы, профессор, Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>.

Гүлзат Сляшқызы Айткалиева* – PhD, қауымдастырылған профессор, «Химиялық және биохимиялық инженерия» кафедрасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>.

Information about the authors

Bekbolat Gylmkhanov – Doctoral student, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bbekaa23@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5554-1061>.

Akerke Kozhanova – Master's student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kozhanova250802@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7154-9370>.

Aigul Amitova – PhD, Researcher, Project Supervisor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aikkash@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7721-6473>.

Madeniet Yelubay – Candidate of Chemical Sciences, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Professor, Toraihyrov University, Republic of Kazakhstan; e-mail: yelubay.m@tou.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-5215>.

Gulzat Aitkaliyeva* – PhD, Associate Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: g.aitkaliyeva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-6317>.

Поступила в редакцию 24.10.2025

Поступила после доработки 01.12.2025

Принята к публикации 02.12.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-77](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-77)

FTAXP: 31.25.19



М.К. Кабулова^{1,2,*}, Т.Қ. Джумадилов², Ж.Қ. Қорғанбаева¹, Ю.В. Гразулявичус³

¹Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,
050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Достық көшесі 13

²«Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ,
050060, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Уалиханов көшесі 106

³Каунас технологиялық университеті,
Литва Республикасы, Каунас қ., Донелайчио көшесі 73

*e-mail: kabulovamk@mail.ru

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ИНТЕРПОЛИМЕРЛІ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ НЕОДИМ ИОНДАРЫН СОРБЦИЯЛАУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Аңдатпа: Бұл зерттеуде неодим иондарын екі өнеркәсіптік сорбенттерден, Amberlite IR120(H⁺) және АВ-17-8(OH) ионалмастырғыш шайырлардан тұратын интерполимерлік жүйелерді пайдалана отырып, олардың ерітінді қоспасынан селективті сорбциялау мүмкіндіктері әртүрлі молярлық қатынаста зерттелді. Алынған нәтижелер негізінде полимерлердің максималды активтенуі Amberlite IR120:AB-17-8 (5:1) қатынастарында болатыны анықталды. Неодим иондарын максималды сорбциялау дәрежесі осы қатынастарда байқалады. Сорбция процесі статикалық режимде жүргізілді. Полимерлердің қашықтан өзара әрекеттесуінің 48 сағатынан кейін неодим иондарын максималды сорбциялау дәрежесі 56,2%, полимерлік тізбектің байланысу дәрежесі 3,96 % болды. Бастапқы активтенбеген Amberlite IR120 (6:0) және АВ-17-8 (0:6) полимерлермен салыстырғанда интерполимерлік жүйелердің сорбциялық белсенділігінің Amberlite IR120: АВ-17-8 (5:1), Amberlite IR120:AB-17-8 (3:3) қатынастарында анағұрлым жоғары болатынын бастапқы полимерлердің жалпы есептік мәндері дәлелдеді. Алынған нәтижелер интерполимерлік жүйелерде бастапқы полимерлердің электрохимиялық және сорбциялық қасиеттерінің өзгеретінін, яғни функционалды топтардың реакцияға түсу қабілеті артатынын көрсетті. Бұл оларды неодим иондарын бөліп алудың тиімді сорбциялық технологиясын жасау үшін қолдануға мүмкіндік береді.

Осылайша, өнеркәсіптік ерітінділерден неодимді тиімді бөліп алу үшін сорбция шарттарын өзгерту арқылы интерполимерлік жүйелерді өнеркәсіпте қолдануға болатыны көрсетілді.

Түйін сөздер: интерполимерлі жүйелер, неодим ионы, сорбция, ИҚ спектр, Amberlite IR120(H⁺), АВ-17-8(OH⁻).

Кіріспе

Сирек жер элементтері (СЖМ) күрделі және қарапайым халық тұтынатын тауарлардың дамуында негізгі рөл атқаратын тапшы шикізат болып табылады. Бұл элементтер өнеркәсіптің көптеген салаларында, соның ішінде металлургияда, энергетикада кеңінен қолданылады.

Сирек кездесетін жер элементтерін бір-бірінен таза түрде бөлу – қазіргі химия технологиясындағы ең өзекті және күрделі мәселелердің бірі болып саналады. Ион алмасу процестері металдарды бөлу және тазарту үшін қолданылады, оның ішінде уранды плутоний мен басқа актинидтерден, сондай-ақ лантан, торий, неодим, иттербий, самарий және лютецийді бір-бірінен және басқа лантаноидтерден бөлу үшін пайдаланылады. Сирек жер металдары (СЖМ) екі топқа бөлінеді: лантаноидтер және актиноидтер. Әр қатардың металдары ұқсас физикалық және химиялық қасиеттерге ие. Көп жылдар бойы экстракция үлкен мөлшердегі сирек жер металдары иондарын бөлудің іс жүзіндегі жалғыз әдісі болды. Шайырларды қолданудың бұл әдісін 1940 жылы Ф. Спейдинг әзірледі [1-5]. Кейінірек еріткіштерді экстракциялау әдісі, жоғары тазалықтағы өнімдерді алу жағдайларынан басқада, іс жүзінде ион алмастырғыш шайырларды пайдаланумен ауыстырылды. Негізгі және қосалқы көздерден СЖМ алудың негізгі әдістері тұндыру, экстракция және сорбция болып табылады [6-10]. СЖМ-н алудың технологиялық процесінің маңыздылығы соңғы жылдары СЖМ-ға сұраныстың тез өсуімен түсіндіріледі, өйткені олар өнімділігі жоғары магниттер, қайта зарядталатын батареялар, энергиясы аз флуоресцентті лампалар сияқты жоғары технологиялық және экологиялық таза технологияларда қолданылады [11].

Неодим компьютерлер мен ұялы телефондар сияқты электроникаға енгізілетін магниттерді өндіру үшін қолданылады [12, 13]. Сондықтан бұл зерттеудің мақсаты статикалық сорбция режимінде неодим иондарына (көптеген салаларда және жоғары технологияларда өзекті болып табылатын метал) қатысты Amberlite IR120(H⁺) және АВ-17-8 (OH⁻) негізіндегі интерполимерлік жүйелерінің селективтілік шарттарын анықтау болды. Қойылған мақсатқа жету үшін келесі тапсырмалар орындалды:

1) әртүрлі қатынастағы катионалмастырғыш пен анионалмастырғыштан тұратын интерполимерлік жүйелер арқылы концентрациясы 5 мг/л үлгі ерітіндіден неодим ионының сорбция динамикасы анықтау;

2) алынған деректер негізінде максималды сорбция болатын арақатынастарды таңдау.

Бұл ионалмастырғыш шайырлар бағасы жағынан арзан, қолжетімділігі жоғары және экологиялық таза болғандықтан сирек кездесетін металдарды ерітінділерден селективті сіңіру мен концентрациялау мақсатында қолданылды. «Қашықтықтан әсер ету» көмегімен Amberlite IR120(H⁺) және АВ-17-8(OH⁻) қосымша ісінеді және конформациясын өзгертеді. Бұл өз кезегінде мыналарға ықпал етуі мүмкін: біріншіден, сорбция көрсеткіштерінің жалпы жақсаруы, екіншіден, неодим иондарына селективтіліктің пайда болуы.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Сорбенттердің массасы Shimadzu AY220 (Жапония) электронды аналитикалық таразысында өлшеу арқылы анықталды. Концентрациялар КФК-3 фотоколориметрі және атомдық эмиссиялық талдау (Thermo Scientific™ iCAP™ PRO XP ICP-OES, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, АҚШ) көмегімен анықталды. Өлшеу қателігі 1%-дан аз болды. Ерітінділердегі сутегі ионының концентрациясын өлшеу үшін «Metrohm 827 pH-Lab» pH-метрі (Metrohm AG, Herizau, Швейцария) қолданылды. Бастапқы ион алмасу құрылымдарының және интерполимер жүйесінің FTIR спектрлері NICOLET 5700 спектрофотометрінің көмегімен алынды (Thermo Fischer Science, Waltham, MA, АҚШ). *Материалдар*

Зерттеулер неодим сульфатының ерітінділерінде жүргізілді (түз: Сигма-Олдрих, Дармштадт, Германия). Ионалмастырғыш шайырлар ретінде Amberlite IR120 (H⁺) күшті қышқылды (Sigma-Oldrich, Германия) катионалмастырғыш және стирол сополимеріне негізделген күшті негізді АВ-17-8 (OH⁻) (Азот, Черкасс, Украина) гель-типті анионалмастырғыш қолданылды. Бұл зерттеуді жүргізу үшін осы полимерлерден катионалмастырғыш пен анионалмастырғыштың молярлық қатынасы әртүрлі интерполимерлі жүйелер құрастырылды.

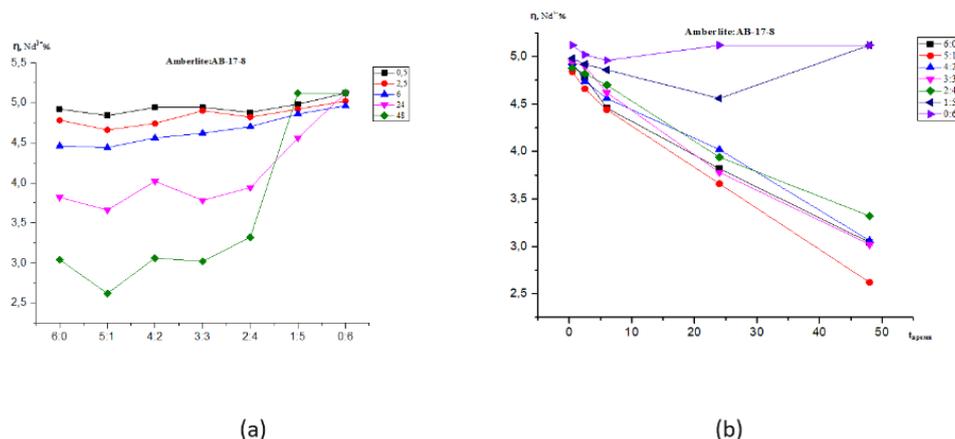
Тәжірибелер бөлме температурасында жүргізілді. Интерполимерлік жүйені зерттеу келесі тәртіпте жүзеге асырылды: әрбір ионалмастырғыш шайыр құрғақ күйінде жеке-жеке полипропиленді торларға орналастырылды, Amberlite IR120:AB-17-8 арақатынасы әртүрлі мольдік қатынастарда болды (6:0 – бастапқы катионит, массасы 0,12 г; 5:1 (0,089 г:0,018 г); 4:2 (0,071 г:0,037 г); 3:3 (0,053 г:0,056 г); 2:4 (0,035 г:0,075 г); 1:5 (0,018 г:0,094 г); және 0:6 (0,113 г) – тек анионит). Содан кейін Amberlite IR120 және AB-17-8 ионалмастырғыш шайырлары бар полипропиленді торларды неодим сульфатының ерітінділері (әрқайсысы 200 мл) бар стакандарға орналастырылды. Неодим ионының тәжірибелері статикалық режимде (араластырмай) бөлек жүргізіліп, сорбция жүргеннен кейін 0.5, 2.5, 6, 24 және 48 сағаттан кейін аликвоттар алынды. Иондардың қалдық концентрациясы фотоколориметр және спектрофотометр көмегімен анықталды.

Зерттеу нәтижелері

Алдыңғы зерттеулер [14, 15] көрсеткендей, қышқылдық (Amberlite IR120, Lewatit) және негіздік (AB-17-8, П4ВП) торланған полимерлерден құралған интерполимерлік жүйелер олардың бастапқы компоненттерімен салыстырғанда айтарлықтай жоғары белсенділікке ие. Сондай-ақ иондардың жоғары сорбциясын қамтамасыз ететін полимерлердің қатынасы қышқылдық және негіздік полимерлердің табиғатына және сирек кездесетін металдардың табиғатына байланысты айтарлықтай ерекшеленетіні анықталды.

Бұл нәтижелер самарий, церий, диспрозий және эрбийдің сорбциялануын интерполимерлік жүйелермен зерттегеннен кейін алынды. Бастапқы полимер күйінің сорбция процесіне әсері де анықталды. Интерполимерлік жұптарды қалыптастыру үшін қандай полимер қолданылатынына байланысты (құрғақ, ісінген немесе ішінара ісінген) сорбциялық қабілеті жоғары полимер жүйелерінде және сирек кездесетін металл иондарының сорбция жылдамдығы әртүрлі полимер қатынасына байланысты болуы мүмкін. Дегенмен, неодим иондарын сорбциялау үшін интерполимерлік жүйелерді пайдаланған жағдайда максималды сорбция мен иондардың селективтілігінің оңтайлы шарттарын анықтау бойынша жұмыс жүргізілген жоқ.

Осы мақсатта сорбция динамикасы металдың (неодим) концентрациясы 5 мг/л болатын үлгілік ерітінділер арқылы 48 сағат бойы жеке зерттелді (тиісінше 0.5, 2.5, 6, 24 және 48 сағаттан кейін аликвоттар алу). 1-суретте полимерлердің әртүрлі молярлық қатынасында (катионалмастырғыш шайыр және анионалмастырғыш шайыр) иондық сорбция нәтижелері берілген.

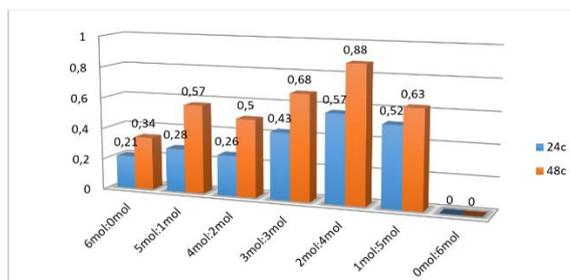


Сурет 1 – Полимерлердің әртүрлі молярлық қатынастарында неодим иондарының қалдық концентрациясының уақыт бойынша өзгеруі

6:0 қатынасында катионит массасы ең үлкен және мақсатты иондарды сорбциялайтын Amberlite IR120(H^+) болғанына қарамастан жеке катионитпен (6:0) салыстырғанда, катионит пен анионит жұптарынан тұратын интерполимерлік жүйелердің сорбция тиімділігі жоғары екені екі графикте де байқалады. 1(a)-суретте ең аз қалдық металл концентрациясы 5:1 жүйесінде 2,22мг/л құрайды, дегенмен бұл қатынаста катионит массасы 6:0 қатынасындағыдан аз. Зерттеу көрсеткендей, Amberlite IR120 және AB-17-8 (5:1) интерполимер жүйесі бастапқы Amberlite IR120 (6:0) ионалмастырғыш шайырымен салыстырғанда неодим иондарының сорбциялық қабілетінің 25%-ға артқанын көрсетті. Сол сияқты, сол интерполимер жүйесі 48

сағат әрекеттесуден кейін АВ-17-8 (0:6) бастапқы ионалмастырғыш шайырымен салыстырғанда сорбциялық қабілетінің 48%-ға артқанын көрсетті (1-сурет, б).

2-суретте көрсетілгендей сорбенттің бір мольіне есептегенде (сурет 2) ең жоғары сорбциялық қабілеттілікке (0,88 мг/ммоль) 2:4 қатынасында байқалған (Amberlite:AB-17-8), бұл АВ-17-8 үлесінің жоғарылауымен ион алмастырғыштардың өзара әрекеттесуінің синергетикалық әсерін көрсетеді. Катиониттің мөлшері азайып, аниониттің мөлшері арттырылғанда жүйенің сорбция дәрежесі де біртіндеп артқан. Бұл жағдайда сіңіру процесі негізінен катионитте жүрген, ал екінші полимер анионит белсендіру процесіне қатысқан.



Сурет – 2 моль полимерге өткен Nd³⁺ иондарының сорбция дәрежесі

Әрбір мақсатты металл ионының әртүрлі әрекеттесу жағдайындағы сорбция сипаттамаларының толық кескінін алу үшін сорбциялаудың тағы екі маңызды көрсеткіші есептелді: полимер тізбегінің жалпы байланысу дәрежесі және тиімді динамикалық сорбция сыйымдылығы.

Нәтижелер 1- және 2-кестелерде келтірілген. Кестедегі мәліметтерге сүйене отырып жүйедегі анионалмастырғыштың мөлшері артқан сайын екінші компоненттің байланысу дәрежесі біртіндеп артқанын байқауға болады. Бұл құбылыс полимердің өзара белсендірілу әсері нәтижесінде катионалмастырғыштың құрылымындағы қосымша торлардың ашылуымен түсіндіріледі. Неодим иондарының полимер тізбегінің (θ) байланысу дәрежесінің максималды алынған мәні 48 сағат әрекеттесуден кейін Amberlite IR120: AB-17-8 (5:1) интерполимер жүйесі үшін 3,96% құрады (1-кесте). Бұл Amberlite IR120 және АВ-17-8 ионалмастырғыштарының өзара активтенуінің нәтижесінде макромолекула иондануының жоғары дәрежесін көрсетеді.

Кесте 1 – Полимер тізбектерінің байланысу дәрежесі (θ,%)

Amberlite IR120:AB-17-8	t, уақыт				
	0.5	2.5	6	24	48
6:0	0.16	0.34	0.71	1.45	2.3
5:1	0.33	0.58	0.88	2.38	3.96
4:2	0.19	0.47	0.72	1.46	2.80
3:3	0.19	0.24	0.63	1.80	2.85
2:4	0.27	0.36	0.52	1.58	2.44
1:5	0.13	0.22	0.30	0.72	0
0:6	0	0.069	0.13	0.22	0.54

Кесте 2 – Тиімді динамикалық сорбциялық сыйымдылық (Q, ммоль/г)

Amberlite IR120:AB-17-8	t, уақыт				
	0.5	2.5	6	24	48
6:0	0.0000092	0.0000173	0.0000358	0.0000727	0.0001178
5:1	0.0000153	0.0000267	0.0000408	0.0000905	0.0001824
4:2	0.0000088	0.0000215	0.0000328	0.0000670	0.0001277
3:3	0.0000087	0.0000112	0.0000288	0.0000814	0.0001291
2:4	0.0000124	0.0000161	0.0000236	0.0000708	0.0001094
1:5	0.0000061	0.0000098	0.0000135	0.0000320	0.0000512
0:6	0	0.0000036	0.0000073	0.0000095	0.0000147

Полимер тізбегінің жалпы байланысу дәрежесі полимер тізбегіндегі қанша байланысу орындарының немесе функционалдық топтардың басқа молекулалармен немесе иондармен әрекеттесетінін көрсететін сандық өлшемді білдіреді. Полимер тізбегінің жалпы байланысу дәрежесі келесі формула бойынша анықталды:

$$\theta = \frac{V_{\text{сорб.}}}{V} \cdot 100\%$$

мұнда $V_{\text{сорб.}}$ сорбцияланған металдың мөлшері, өлшем бірлік – моль; v – полимер байланыстарының жалпы саны (ерітіндіде екі гидрогель болса, ол әрбір полимер гидрогелінің байланыстарының қосындысы ретінде есептеледі), моль; θ – полимер тізбегінің жалпы байланысу дәрежесі.

Тиімді динамикалық сорбциялық сыйымдылық – бұл материал динамикалық режимде тиімді ұстай алатын заттың мөлшерін анықтайтын сорбциялық материалдың сандық сипаттамасы. Тиімді динамикалық сорбциялық сыйымдылық келесі формула бойынша есептеледі:

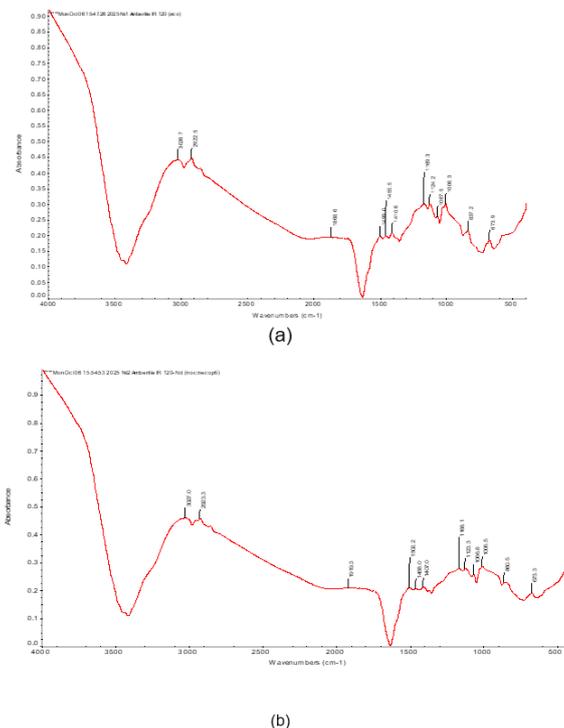
$$Q = \frac{V_{\text{сорб.}}}{m_{\text{сорбент}}} \cdot 100\%$$

Алынған нәтижелер өнеркәсіптік ионалмастырғыштар негізіндегі интерполимерлік жүйелерді пайдалана отырып, неодим иондарын алудың тиімді сорбциялық технологиясын құру мүмкіндігін көрсетеді.

4,5-суреттерде төрт үлгінің ИҚ-спектрлері келтірілген: сорбцияға дейінгі бастапқы Amberlite IR120 катиониты, 5:1 қатынасымен дайындалған жүйеден алынған Amberlite IR120, 5:1 қатынасымен дайындалған жүйеден алынған АВ-17-8 және бастапқы АВ-17-8 аниониті (сорбция басталғаннан кейін 48 сағат өткен соң).

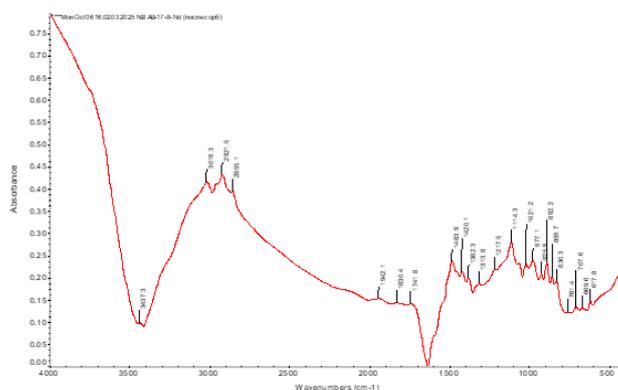
Осы ИҚ-спектрлерді талдау арқылы – SO_3^- функционалдық тобының және жалпы Amberlite IR120 катионитіне тән жұтылу жолақтарын көруге болады. Оларға сіңіру жолақтары (а) – бастапқы Amberlite IR120: 673.9 (C-S байланысқан); 1200-1000 аймақта – SO_3^- тобына сәйкес (1067.5, 1124.2, 1169.3) [16]. Amberlite IR120 (b), (сорбциядан кейін 5:1): 673,3 (C-S); 1006.5, 1068.8, 1123.3, 1168.1 ($-\text{SO}_3^-$ тобы).

Бастапқы катионалмастырғыштың ИҚ-спектрлерін сорбциядан кейінгі үлгілермен салыстыру кезіндегі жалпы сурет неодим металдың полимер матрицасына сіңуіне байланысты айқын өзгерістерді көрсетеді. b үлгілері ИҚ спектрінде бастапқы Amberlite IR120 (a) үлгісінен ерекшеленеді. Сондай-ақ (b) үлгіде сорбциядан кейін жаңа шыңдар сәйкесінше 860.5, 585,5 және 1919.3 пайда болды. Әзірге біз бұл абсорбция аймақтарында қандай да бір жаңа ақпарат бар-жоғын нақты айта алмаймыз, олар катионалмастырғыштың функционалдық тобында металл иондары мен оттегі арасындағы координациялық байланыстардың пайда болуын көрсетуі мүмкін. Бірақ, сынама (a) (сорбцияға дейінгі катионит) (b) үлгісінен ерекшеленетінін сенімді түрде айтуға болады, бұл сорбция процесінің болғанын растайды.

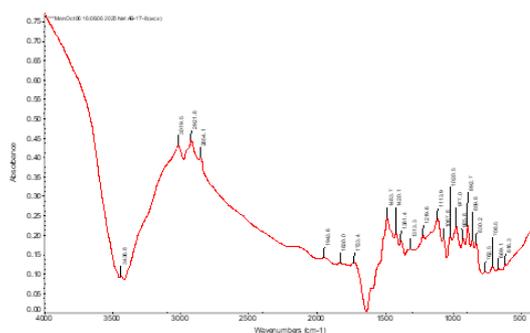


Сурет 4 – Фурье-ИҚ спектрлері:
(a) бастапқы Amberlite IR120; (b) сорбциядан кейінгі Amberlite IR120 (5:1) қатынаста

5 – суреттегі (а және б) АВ-17-8 үлгісінің ИҚ спектріне тоқталсақ, мұнда (b) бастапқы анонит, (а) 5:1 қатынасындағы анонит. Бұл суреттен бастапқы анонит спектрі сорбциядан кейінгі АВ-17-8 спектрімен бірдей екені көрініп тұр. Бұл АВ-17-8 құрылымында айтарлықтай өзгерістер болмағанын көрсетеді, себебі бұл полимерде неодим катиондары сорбцияға ұшырамаған. Бұл анонит ерітіндідегі катиондарды сіңірмейді деген қарапайым логикаға сәйкес келеді. Сондықтан интерполимерлік жүйелерде анониттің рөлі катионитті өзара белсендіру болып табылады, бұл екі сорбенттің үлкен иондануына және сәйкесінше сорбция көрсеткіштерінің жақсаруына әкеледі.



(a)



(b)

Сурет 5 – Фурье-ИҚ спектрлері:

(a) бастапқы АВ-17-8; (b) сорбциядан кейінгі АВ-17-8 (5:1) қатынаста

Қорытынды

Алынған нәтижелер сирек кездесетін металдарды алуда интерполимерлік жүйені қолдану тиімді әдіс екенін растайды. Белсендірілген полимерлер жеке Amberlite IR120 (6:0) және АВ-17-8 (0:6) полимерлермен салыстырғанда сорбциялық белсенділіктің жоғары болатынын көрсетті. Бұл зерттеу полимерлердің максималды активтенуі Amberlite IR120:АВ-17-8 5:1-ге тең молярлық қатынасында анықталды.

Amberlite IR120 (6:0) және АВ-17-8 (0:6) жеке полимерлермен 48 сағат сорбциялаудан кейін неодим иондарының жалпы сорбциялану дәрежесі сәйкесінше 40.1% және 26% құрады, ал неодим иондарының Amberlite IR120:АВ-17-8 (5:1) интерполимерлік жүйесі бойынша сорбциялану дәрежесі 56.2% болды.

Жеке полимерлермен салыстырғанда Amberlite IR120:АВ-17-8 (5:1) интерполимерлік жүйесі бойынша неодим иондарының сорбциялық дәрежесінің жоғарылауын дистанциялық әсерлесу эффектісімен белсендірілген интерполимер жүйесінің жоғары иондану дәрежесіне жетуімен түсіндіруге болады, бұл Қазақстанда сирек кездесетін элементті сорбциялаудың инновациялық мақсатты технологияларын дамыту үшін жаңа мүмкіндіктер ашады.

Әдебиеттер тізімі

1. Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology / M. Mulder. – Springer: Netherlands, 1996. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8>.
2. Khaing Z., Troshkina A.: Sorp. Chromatogr. Proc., 2006. – № 6. – P. 972.

3. Ion Exchangers; Dorfner, K., Ed.; Walter de Gruyter: Berlin, 1991. <https://doi.org/10.1515/9783110862430>.
4. Harland C.E. Ion Exchange: Theory and Practice, 2 nd edn.; The Royal Society of Chemistry, 1994. <https://doi.org/10.1039/9781847551184>
5. Alekseeva S.L. Sorption of Cr(VI) on AV-17 and EDE-10P Anion Exchangers, KU-2 and KB-4 Cation Exchangers, Activated Charcoal, and Foamed Graphite (STRG) is Studied / S.L. Alekseeva, S.N. Bolotin, T.G. Tsupko // J. Appl. Chem. – 2007. – № 80. – P. 376-378. <https://doi.org/10.1134/S107042720703007X>.
6. Ivanik S.A. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes / S.A. Ivanik, D.A. Ilyukhin // J. Min. Inst. – 2020. – № 242. – P. 202-208. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.202>.
7. A facile process for enhanced rare earth elements separation from dilute solutions using N, N-di(2-ethylhexyl)-diglycolamide grafted polymer resin / H. Cui et al // Sep. Purif. Technol. – 2020. – № 234. – P. 116096. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116096>.
8. Extraction of Rare-Earth Elements (III) from Nitric Acid Solutions with Diethyl 2-[(Diphenylphosphoryl)methoxy]-5-ethylphenylphosphonate / A.N. Turanov et al // Russ. J. Inorg. Chem. – 2019. – № 64. – P. 1297-1303. <https://doi.org/10.1134/S0036023619100164>.
9. Improving the selective extraction of lanthanides by using functionalised ionic liquid / L. Maria et al // Sep. Purif. Technol. – 2020. – № 237. – P. 116354. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152423>.
10. Swain, N.; Mishra, S.; Acharya, M.R. Hydrometallurgical route for recovery and separation of samarium (III) and cobalt (II) from simulated waste solution using tri-n-octyl phosphine oxide – A novel pathway for synthesis of samarium and cobalt oxides nanoparticles / N. Swain et al // J. Alloys Compd. – 2020. – № 815. – P. 152423. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152423>.
11. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact / V. Balaram // Geosci. Front. – 2019. – № 10. – P. 1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.
12. Understanding rare earth elements as critical raw materials / W.L. Filho et al // Sustainability. – 2023. – № 15. – P. 1919. <https://doi.org/10.3390/su15031919>.
13. Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact / N. Haque et al // C. Resources. – 2014. – № 3. – P. 614-635. <https://doi.org/10.3390/resources3040614>.
14. Ion Exchange Dynamics in Cerium Nitrate Solution Regulated by Remotely Activated Industrial Ion Exchangers / T. Jumadilov et al // Materials. – 2021. – № 14. – P. 3491. <https://doi.org/10.3390/ma14133491>.
15. Создание принципиально новой технологии группового извлечения ионов редкоземельных металлов из продуктовых растворов металлургии / Т.К. Джумадилов и др. // Тенденции, перспективы и инновационные подходы развития химической науки, производства и образования в условиях глобализации: сборник научных трудов. – Алматы. – 2021. – С. 90-104.
16. Ulusoy Erol H.B. Effects of resin chemistries on the selective removal of industrially relevant metal ions using wafer-enhanced electrodeionization / H.B. Ulusoy Erol, C.N. Hestekin, J.A. Hestekin // Membranes. – 2021. – № 11. – P. 45. <https://doi.org/10.3390/membranes11010045>.

References

1. Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology / M. Mulder. – Springer: Netherlands, 1996. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8>. (In English).
2. Khaing Z., Troshkina A.: Sorp. Chromatogr. Proc., 2006. – № 6. – R. 972. (In English).
3. Ion Exchangers; Dorfner, K., Ed.; Walter de Gruyter: Berlin, 1991. <https://doi.org/10.1515/9783110862430>. (In English).
4. Harland C.E. Ion Exchange: Theory and Practice, 2 nd edn.; The Royal Society of Chemistry, 1994. <https://doi.org/10.1039/9781847551184> (In English).
5. Alekseeva S.L. Sorption of Cr(VI) on AV-17 and EDE-10P Anion Exchangers, KU-2 and KB-4 Cation Exchangers, Activated Charcoal, and Foamed Graphite (STRG) is Studied / S.L. Alekseeva, S.N. Bolotin, T.G. Tsupko // J. Appl. Chem. – 2007. – № 80. – R. 376-378. <https://doi.org/10.1134/S107042720703007X>. (In English).

6. Ivanik S.A. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes / S.A. Ivanik, D.A. Ilyukhin // J. Min. Inst. – 2020. – № 242. – R. 202-208. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.202>. (In English).
7. A facile process for enhanced rare earth elements separation from dilute solutions using N, N-di(2-ethylhexyl)-diglycolamide grafted polymer resin / N. Cui et al // Sep. Purif. Technol. – 2020. – № 234. – R. 116096. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116096>. (In English).
8. Extraction of Rare-Earth Elements (III) from Nitric Acid Solutions with Diethyl 2-[(Diphenylphosphoryl)methoxy]-5-ethylphenylphosphonate / A.N. Turanov et al // Russ. J. Inorg. Chem. – 2019. – № 64. – R. 1297-1303. <https://doi.org/10.1134/S0036023619100164>. (In English).
9. Improving the selective extraction of lanthanides by using functionalised ionic liquid / L. Maria et al // Sep. Purif. Technol. – 2020. – № 237. – R. 116354. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152423>. (In English).
10. Swain, N.; Mishra, S.; Acharya, M.R. Hydrometallurgical route for recovery and separation of samarium (III) and cobalt (II) from simulated waste solution using tri-n-octyl phosphine oxide – A novel pathway for synthesis of samarium and cobalt oxides nanoparticles / N. Swain et al // J. Alloys Compd. – 2020. – № 815. – R. 152423. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152423>. (In English).
11. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact / V. Balaram // Geosci. Front. – 2019. – № 10. – R. 1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>. (In English).
12. Understanding rare earth elements as critical raw materials / W.L. Filho et al // Sustainability. – 2023. – № 15. – R. 1919. <https://doi.org/10.3390/su15031919>. (In English).
13. Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact / N. Haque et al // C. Resources. – 2014. – № 3. – R. 614-635. <https://doi.org/10.3390/resources3040614>. (In English).
14. Ion Exchange Dynamics in Cerium Nitrate Solution Regulated by Remotely Activated Industrial Ion Exchangers / T. Jumadilov et al // Materials. – 2021. – № 14. – R. 3491. <https://doi.org/10.3390/ma14133491>. (In English).
15. Sozdanie principial'no novoj tekhnologii gruppovogo izvlecheniya ionov redkozemel'nyh metallov iz produktovyh rastvorov metallurgii / T.K. Dzhumadilov i dr. // Tendencii, perspektivy i innovacionnye podhody razvitiya himicheskoy nauki, proizvodstva i obrazovaniya v usloviyah globalizacii: sbornik nauchnyh trudov. – Almaty. – 2021. – S. 90-104. (In Russian).
16. Ulusoy Erol H.B. Effects of resin chemistries on the selective removal of industrially relevant metal ions using wafer-enhanced electrodeionization / H.B. Ulusoy Erol, C.N. Hestekin, J.A. Hestekin // Membranes. – 2021. – № 11. – R. 45. <https://doi.org/10.3390/membranes11010045>. (In English).

М.К. Кабулова^{1,2*}, Т.К. Джумадилов², Ж.К. Корганбаева¹, Ю.В. Гразулявичюс³

¹Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, улица Достык 13

²АО «А.Б. Институт химических наук им. Бектурова»,
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, улица Уалиханова 106

³Каунасский технологический университет,
Республика Литва, г. Каунас, ул. Донелайчио 73

*e-mail: kabulovamk@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИИ ИОНОВ НЕОДИМА МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ИНТЕРПОЛИМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ

В данной работе исследована селективная сорбция ионов неодима из смеси растворов с использованием интерполимерных систем, состоящих из двух промышленных сорбентов – ионообменных смол Amberlite IR120(H⁺) и АВ-17-8(OH⁻), в различных мольных соотношениях. На основании полученных результатов установлено, что максимальная активация полимеров происходит при соотношении Amberlite IR120:АВ-17-8 (5:1). При этих соотношениях наблюдается максимальная степень сорбции ионов неодима. Процесс сорбции проводили в статическом режиме. Через 48 часов дистанционного взаимодействия полимеров максимальная степень сорбции ионов неодима составила 56,2%, а степень связывания полимерной цепи – 3,96%. Суммарные расчетные значения неактивированных полимеров доказали, что сорбционная активность интерполимерных систем в соотношениях Amberlite IR120:АВ-17-8 (5:1), Amberlite IR120:АВ-17-8 (3:3) существенно выше, чем у исходных неактивированных полимеров Amberlite IR120 (6:0) и АВ-17-8 (0:6). Полученные результаты показали, что в интерполимерных системах изменяются электрохимические и

сорбционные свойства исходных полимеров, то есть увеличивается способность функциональных групп к реагированию. Это позволяет использовать их для разработки эффективной сорбционной технологии разделения ионов неодима. Таким образом, показано, что интерполимерные системы могут быть использованы в промышленности путем изменения условий сорбции для эффективного выделения неодима из промышленных растворов.

Ключевые слова: интерполимерные системы, ион неодима, сорбция, ИК спектр, Amberlite IR120(H⁺), AB-17-8(OH⁻).

М.К. Kabulova^{1,2*}, Т.К. Jumadilov², Zh.K. Korganbaeva¹, J.V. Grazulevicius³

¹Abai Kazakh National Pedagogical University,

050060, Republic of Kazakhstan, Almaty, Dostyk 13 Street

²JSC «A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences»,

050060, Republic of Kazakhstan, Almaty, Ualikhanov 106 Street

³Kaunas University of Technology,

Republic of Lithuania, Kaunas, Donelaičio 73 Street

*e-mail: kabulovamk@mail.ru

FEATURES OF NEODYMIUM ION SORPTION BY MODIFIED INTERPOLYMER SYSTEMS

In this study, we investigated the selective sorption of neodymium ions from a mixture of solutions using interpolymer systems consisting of two industrial sorbents – Amberlite IR120(H⁺) and AB-17-8(OH⁻) ion exchange resins – in various molar ratios. Based on the obtained results, we found that maximum polymer activation occurs at an Amberlite IR120:AB-17-8 ratio of 5:1. These ratios yield the highest neodymium ion sorption. The sorption process was carried out in static mode. After 48 hours of remote polymer interaction, the maximum neodymium ion sorption was 56.2%, and the degree of polymer chain binding was 3.96%. The calculated values of the unactivated polymers demonstrated that the sorption activity of the interpolymer systems in the Amberlite IR120:AB-17-8 (5:1) and Amberlite IR120:AB-17-8 (3:3) ratios is significantly higher than that of the original unactivated polymers Amberlite IR120 (6:0) and AB-17-8 (0:6). The results demonstrate that the electrochemical and sorption properties of the original polymers are altered in the interpolymer systems, increasing the reactivity of the functional groups. This allows them to be used in the development of an effective sorption technology for the separation of neodymium ions. Thus, it is demonstrated that the interpolymer systems can be used in industry by varying the sorption conditions for the efficient extraction of neodymium from industrial solutions.

Key words: interpolymer systems, neodymium ion, sorption, IR spectrum, Amberlite IR120(H⁺), AB-17-8(OH⁻).

Авторлар туралы мәліметтер

Мадина Кабуловна Кабулова* – PhD докторант, Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан; email:kabulovamk@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7059-5635>

Талқыбек Қожатаевич Джумадилов – х.ғ.д., профессор, «А.Б. Бектұров атындағы Химия ғылымдары институты» АҚ полимерлер синтезі және физикохимиясы зертханасының меңгерушісі, Алматы қаласы, Қазақстан; email: jumadilov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9505-3719>.

Жанар Қожамбердіқызы Қорғанбаева – х.ғ.к., аға оқытушы, Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан; e-mail: korganbaeva.zhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3423-7116>.

Юозас Видас Гражулявичюс – х.ғ.д., профессор, Химия және полимерлер химиясы кафедрасының меңгерушісі, Каунас университеті, Каунас қаласы, Литва; e-mail: juozas.grazulevicius@ktu.lt. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-9727>.

Сведения об авторах

Мадина Кабуловна Кабулова* – PhD докторант, Казахский Национальный университет имени Абая, Алматы, Казахстан; e-mail:kabulovamk@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7059-5635>.

Талқыбек Қожатаевич Джумадилов – д.х.н., профессор, заведующий лабораторией синтеза и физикохимии полимеров АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектұрова», Алматы, Казахстан; e-mail: jumadilov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9505-3719>.

Жанар Қожамбердіқызы Қорғанбаева – к.х.н., старший преподаватель, Казахский Национальный университет имени Абая, Алматы, Казахстан; e-mail:korganbaeva.zhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3423-7116>.

Юозас Видас Гражулявичюс – д.х.н., профессор, заведующий кафедры химии и технологии полимеров Каунасского технологического университета, Каунас, Литва; e-mail: juozas.grazulevicius@ktu.lt. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-9727>.

Information about the authors

Madina Kabulovna Kabulova* – PhD student, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: kabulovamk@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7059-5635>.

Talkybek Kozhataevich Dzhumadilov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Synthesis and Physical Chemistry of Polymers, «A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences», Almaty, Kazakhstan; e-mail: jumadilov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9505-3719>.

Zhanar Kozhamberdikyzy Korganbaeva – senior teacher, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: korganbaeva.zhan@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3423-7116>.

Juozas Vidas Grazulevicius – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology of Polymers, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania; e-mail: juozas.grazulevicius@ktu.lt. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4408-9727>.

Редакцияға енуі 22.10.2025

Жариялауға қабылданды 05.12.2025