DOI: 10.65322/j.srd.06202026.44

UDK: 669.21/.23:579.66

MODIFIKATSIYALANGAN SAPONIT ASOSIDA NODIR YER ELEMENTLARINING ADSORBSIYASI

Pirnazarov F.G., *PhD,*
E-mail: fg.pirnazarov@mail.ru;
Umirov F.E., *t.f.d. (DSc),*
E-mail: umirov3@yandex.com;
Qurbonov M.N., *assistent,*
E-mail: mehrob.qurbonov99@gmail.com;
Aripov A.R., *PhD,*
E-mail: avaz.aripov.82@bk.ru,
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti

Annotatsiya. *Mazkur tadqiqotda Rossiyaning Arxangelsk viloyatidagi Lomonosov konidan olingan saponit asosida yuqori samarali sorbent ishlab chiqish va uni nodir yer elementlarini (NYE) ajratib olishda qo‘llash imkoniyatlari o‘rganildi. Saponit namunalari termik (625 °C) va kimyoviy (temir asosida ustunlash/pillaring) modifikatsiyalandi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, modifikatsiyalangan saponitlarning adsorbsion sig‘imi sezilarli darajada oshib, maksimal 18,8 mg/g ga yetdi. Optimal sharoitlar (pH = 4,1; kontakt vaqti – 4 soat; sorbent:eritma nisbati – 1:33) da NYE ni ajratib olish darajasi 99 % gacha yetishi aniqlandi. Olingan natijalar modifikatsiyalangan saponitlarning samarali, ekologik xavfsiz va iqtisodiy jihatdan maqbul sorbent ekanligini ko‘rsatadi.*

Аннотация. *В данном исследовании изучены возможности разработки высокоэффективного сорбента на основе сапонита, полученного из месторождения Ломоносовское Архангельской области России, и его применения для извлечения редкоземельных элементов (РЗЭ). Образцы сапонита подвергались термической (при температуре 625 °C) и химической (железосодержащему пилларированию) модификации. Согласно результатам исследования, адсорбционная ёмкость модифицированных образцов сапонита значительно возросла и достигла максимального значения 18,8 мг/г. Установлено, что при оптимальных условиях (pH = 4,1; продолжительность контакта — 4 часа; соотношение сорбент:раствор — 1:33) степень извлечения РЗЭ достигает 99 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что модифицированные сапониты являются эффективными, экологически безопасными и экономически целесообразными сорбентами.*

Abstract. *This study investigated the possibilities of developing a highly efficient sorbent based on saponite obtained from the Lomonosov deposit in the Arkhangelsk Region of Russia and its application for the extraction of rare earth elements (REEs). Saponite samples were subjected to thermal (at 625 °C) and chemical (iron-based pillaring) modification. According to the research results, the adsorption capacity of the modified saponite samples increased significantly, reaching a maximum value of 18.8 mg/g. It was established that under optimal conditions (pH = 4.1; contact time – 4 hours; sorbent-to-solution ratio – 1:33), the extraction efficiency of REEs reached up to 99%. The obtained results demonstrate that modified saponites are effective, environmentally friendly, and economically viable sorbents.*

Kalit so‘zlar: *saponit, adsorbsiya, nodir yer elementlari, modifikatsiya, sorbent, magnetit.*

Ключевые слова: *сапонит, адсорбция, редкоземельные элементы, модификация, сорбент, магнетит.*

Keywords: *saponite, adsorption, rare earth elements, modification, sorbent, magnetite.*

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.44

Kirish. Hozirgi vaqtda jahon sanoatida nodir yer elementlariga (NYE) bo‘lgan talabning ortib borishi ularni tabiiy mineral xomashyolar, sanoat chiqindilari va ikkilamchi resurslardan samarali ajratib olish texnologiyalarini ishlab chiqishni dolzarb masalalardan biriga aylantirmoqda. Nodir yer elementlari elektronika, elektrotexnika, metallurgiya, kimyo sanoati, qayta tiklanuvchi energetika hamda zamonaviy yuqori texnologik qurilmalar ishlab chiqarishda muhim xomashyo hisoblanadi. Shu sababli ularni ajratib olish, tozalash va qayta ishlashning samarali, iqtisodiy jihatdan maqbul hamda ekologik xavfsiz usullarini yaratish alohida ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Nodir yer elementlarini suvli eritmalardan ajratib olishda adsorbsiya usuli istiqbolli texnologiyalardan biri hisoblanadi. Ushbu usulning asosiy afzalliklari jarayonning nisbatan soddaligi, yuqori samaradorligi, kam energiya talab qilishi va turli tarkibdagi eritmalarga qo‘llash imkoniyatining mavjudligidir. Biroq adsorbsiya jarayonining samaradorligi ko‘p jihatdan qo‘llaniladigan sorbentning mineralogik tarkibi, g‘ovaklik darajasi, solishtirma yuzasi hamda faol adsorbsion markazlarining miqdoriga bog‘liq.

So‘nggi yillarda tabiiy alyumosilikat minerallari, xususan, montmorillonit, bentonit, seolit va saponit asosida yuqori samarali sorbentlar olishga qaratilgan tadqiqotlar keng rivojlanmoqda. Ular orasida saponit o‘zining qatlamli tuzilishi, yuqori ion almashinish qobiliyati, kimyoviy barqarorligi va modifikatsiyalash imkoniyatlari bilan alohida ahamiyatga ega. Saponitning tabiiy adsorbsion xususiyatlarini termik va kimyoviy usullar yordamida takomillashtirish orqali uning nodir yer elementlariga nisbatan selektivligi va adsorbsion sig‘imini oshirish mumkin.

Ayniqsa, saponit tarkibiga temir birikmalarini kiritish, jumladan, magnetit (Fe_3O_4) hosil qilish orqali uning sirt xususiyatlarini o‘zgartirish va qo‘shimcha faol markazlarni shakllantirish muhim yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Bunday modifikatsiyalash natijasida sorbentning adsorbsion faolligi oshishi, ayrim nodir yer elementlarini tanlab ajratish imkoniyatlari kengayishi mumkin.

Shu nuqtayi nazardan, Rossiyaning Arxangelsk viloyatidagi Lomonosov kon-boyitish kombinatidan olingan saponitni termik va temir asosida kimyoviy modifikatsiyalash hamda uning nodir yer elementlarini adsorbsiyalash xususiyatlarini o‘rganish dolzarb ilmiy vazifa hisoblanadi. Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi tabiiy va modifikatsiyalangan saponit namunalarining adsorbsion xususiyatlarini qiyosiy baholash, adsorbsiya jarayonining optimal sharoitlarini aniqlash hamda nodir yer elementlarini yuqori samaradorlik bilan ajratib olish imkoniyatlarini asoslashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili. So‘nggi yillarda nodir yer elementlarini (NYE) tabiiy mineral xomashyolar va sanoat chiqindilari tarkibidan ajratib olish, ularni konsentrlash hamda qayta ishlash texnologiyalarini takomillashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar kengayib bormoqda. Ayniqsa, nodir yer elementlarini suvli eritmalardan selektiv ajratib olishda tabiiy alyumosilikat minerallari asosida samarali sorbentlar yaratish muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etmoqda. Bu borada saponit, montmorillonit, bentonit va boshqa qatlamli silikat minerallari o‘zining ion almashinish qobiliyati, qatlamli tuzilishi hamda kimyoviy modifikatsiyalash imkoniyatlari bilan alohida e’tiborga loyiq.

Nodir yer elementlarining gil minerallarida adsorbsiyalanish mexanizmlarini o‘rganish bo‘yicha Anastopoulos I., Bhatnagar A. va Lima E.C. tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda turli sorbentlarning nodir yer metallari ionlarini yutish xususiyatlari tahlil qilingan. Mualliflar adsorbsiya samaradorligi sorbentning sirt xususiyatlari, eritmaning pH qiymati, ionlarning tabiati va jarayon sharoitlariga bevosita bog‘liqligini ta’kidlaganlar. Ushbu ilmiy qarashlar nodir yer elementlarini ajratib olishda mineral sorbentlarning imkoniyatlarini baholash uchun muhim nazariy asos hisoblanadi [1].

Iannicelli-Zubiani E.M. va hammualliflar tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda tabiiy gil minerallaridan nodir yer ionlarini sorbsiyalashda foydalanish imkoniyatlari o‘rganilgan.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.44

Tadqiqotda sorbentlarning tarkibi, strukturaviy xususiyatlari va adsorbsiya jarayonining optimal parametrlarini belgilash masalalariga alohida e'tibor qaratilgan. Mualliflarning xulosalariga ko'ra, tabiiy gil minerallari nodir yer ionlarini suvli muhitdan ajratib olishda istiqbolli materiallar hisoblanadi [2].

Nodir yer elementlarini gil minerallarida adsorbsiyalash mexanizmlari bo'yicha Zhenxiao Wu va hammualliflar tomonidan 2023-yilda chop etilgan sharh maqolada ushbu elementlarning gil minerallariga yutilishi va qayta desorbsiyalanishi batafsil tahlil qilingan. Mualliflar nodir yer elementlarining mineral yuzasida to'planishiga eritmaning pH qiymati, mineralning kristall-kimyoviy tuzilishi va ion almashinish xususiyatlari ta'sir ko'rsatishini ta'kidlaganlar. Tadqiqotda ayniqsa og'ir nodir yer elementlarining gil minerallari bilan o'zaro ta'siri va ularni eritmaga qaytarib olish mexanizmlariga alohida e'tibor qaratilgan [3, 4]. Kaolinitda suv, NaCl, Na_2SO_4 va $NaHCO_3$ eritmalaridan NYE adsorbsiyasi bo'yicha tajribalar ham o'tkazilgan [5].

Bishop B.A. va hammualliflarning 2024-yilda Environmental Science & Technology jurnalida e'lon qilingan tadqiqotida nodir yer elementlarining gil minerallariga adsorbsiyalanish mexanizmlari molekulyar darajada o'rganilgan. Mualliflar ikkilamchi manbalardan nodir yer elementlarini qayta ajratib olishda gil minerallaridan foydalanish istiqbollarini asoslab berganlar. Mazkur ishda mineral yuzasidagi faol markazlar, ion almashinish jarayonlari va elementlarning sorbent bilan bog'lanish xususiyatlari muhim omillar sifatida ko'rib chiqilgan [6].

Liu X. va hammualliflar tomonidan 2022-yilda chop etilgan ilmiy sharhda gil minerallarining metall ionlarini ushlab qolish mexanizmlari molekulyar darajada tahlil qilingan. Tadqiqotda kation almashinish, sirt komplekslari hosil bo'lishi, ligand almashinuvi va mineral strukturasiga ionlarning birikishi kabi jarayonlar yoritilgan. Ushbu mexanizmlar saponit kabi qatlamli minerallarning adsorbsion xususiyatlarini tushuntirishda muhim nazariy asos bo'lib xizmat qiladi [7].

Iannicelli-Zubiani E.M. va hammualliflar tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda tabiiy gil minerallaridan lantan va neodim kabi nodir yer elementlarini suvli eritmalardan ajratib olish imkoniyatlari o'rganilgan. Mualliflar montmorillonit guruhiga mansub tabiiy minerallarning sorbsion xususiyatlarini baholab, adsorbsiya jarayoniga ta'sir etuvchi texnologik parametrlarni aniqlaganlar. Shuningdek, adsorbsiyalangan nodir yer elementlarini qayta desorbsiyalash imkoniyatlari ham tadqiq etilgan. Ushbu natijalar tabiiy alyumosilikat minerallaridan ikkilamchi xomashyo va sanoat chiqindilarini qayta ishlashda foydalanish mumkinligini ko'rsatadi [2].

Temir birikmalari bilan modifikatsiyalangan gil minerallarining adsorbsion xususiyatlarini o'rganish ham alohida ilmiy ahamiyatga ega. 2023-yilda Applied Clay Science jurnalida chop etilgan tadqiqotda temir ionlarining kaolinit yuzasida nodir yer elementlari bilan birgalikda adsorbsiyalanishi o'rganilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, temirning FeOOH shaklida mineral yuzasida to'planishi nodir yer elementlarining keyingi ion almashinish yo'li bilan ajratib olinishiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Bu holat temir asosida modifikatsiyalangan sorbentlarni ishlab chiqishda temir birikmalarining shakli, miqdori va mineral yuzasida joylashishini nazorat qilish zarurligini ko'rsatadi [8].

Saponit mineralini o'rganish va uni qayta ishlash bo'yicha O'zbekiston olimlari tomonidan ham qator ilmiy tadqiqotlar olib borilgan [9]. Jumladan, Umirov F.E., Muzaffarov A.M., Pirnazarov F.G. va Umirov U.F. tomonidan 2020-yilda chop etilgan ilmiy ishda saponit mineralining kimyoviy tarkibi va fizik-kimyoviy xususiyatlari o'rganilgan. Mualliflar mineralning tarkibiy xususiyatlarini aniqlash orqali undan turli kimyoviy mahsulotlar olish imkoniyatlarini baholaganlar. Mazkur tadqiqotlar saponitni nafaqat tabiiy mineral xomashyo, balki turli texnologik jarayonlar uchun istiqbolli material sifatida qarashga asos yaratadi [10].

Umirov F.E. va Pirnazarov F.G. tomonidan 2023-yilda olib borilgan tadqiqotlarda magniy oksidiga boy mahalliy saponit mineralining tarkibi hamda undan magniy xlorid va boshqa kimyoviy birikmalar olish imkoniyatlari o'rganilgan. Mualliflar saponitni kimyoviy qayta ishlash

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.44

orqali uning tarkibidagi foydali komponentlardan kompleks foydalanish yo‘nalishlarini asoslaganlar [11]. Shuningdek, Pirnazarov F.G. va Umirov F.E. tomonidan 2024-yilda chop etilgan ishlarda saponit mineralini konversiya usulida qayta ishlash masalalari yoritilgan. Ushbu tadqiqotlar saponitning kimyoviy faolligi va uni turli texnologik usullar bilan qayta ishlash imkoniyatlarini o‘rganishda muhim ahamiyatga ega [12].

Umirov F.E., Pirnazarov F.G. va Qurbonov M.N. tomonidan 2025-yilda e’lon qilingan “Saponit mineralini konversiya yo‘li bilan qayta ishlash texnologiyasini ishlab chiqish” nomli maqolada mahalliy saponit mineralini kimyoviy qayta ishlash va undan magniy birikmalarini olish texnologiyasi tadqiq etilgan. Mazkur ish saponitni kompleks qayta ishlash, uning kimyoviy tarkibidan samarali foydalanish va yangi texnologik mahsulotlar olish imkoniyatlarini asoslaydi [13].

Shuningdek, Umirov F.E., Aripov A.R., Pirnazarov F.G. va Sayfullayev F.I. tomonidan 2025-yilda olib borilgan tadqiqotda Uchtut konidan olingan saponit mineralining mineralogik tarkibi kimyoviy, rentgen-fazaviy, infraqizil spektroskopik va termik tahlil usullari yordamida o‘rganilgan. Tadqiqot natijalari saponit tarkibidagi asosiy mineral komponentlarni aniqlash va undan magniy birikmalarini ajratib olish imkoniyatlarini baholashga qaratilgan. Ushbu ish saponitning mineralogik xususiyatlarini chuqur o‘rganish va uni maqsadli modifikatsiyalash uchun muhim ilmiy asos hisoblanadi [14].

Yuqorida keltirilgan ilmiy tadqiqotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, tabiiy gil minerallari, xususan, saponit nodir yer elementlarini adsorbsiyalash va ajratib olish uchun istiqbolli sorbent materiallar hisoblanadi. Biroq saponitning termik va temir asosida kimyoviy modifikatsiyalangan shakllarini birgalikda taqqoslash, ularning nodir yer elementlariga nisbatan adsorbsion sig‘imini baholash hamda optimal texnologik sharoitlarini aniqlash masalalari yanada chuqur tadqiq etishni talab qiladi.

Shu sababli mazkur tadqiqotda Lomonosov konidan olingan saponit namunalari asosida tabiiy, termik va temir bilan modifikatsiyalangan sorbentlarning adsorbsion xususiyatlarini qiyosiy o‘rganish, adsorbsiya jarayoniga pH, kontakt vaqti hamda sorbent va eritma nisbatining ta’sirini aniqlash asosiy ilmiy yo‘nalish sifatida belgilandi. Bu esa nodir yer elementlarini yuqori samaradorlik bilan ajratib olishga mo‘ljallangan yangi sorbent materiallarni yaratish uchun muhim ilmiy-amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Materiallar va usullar. Mazkur tadqiqotda mualliflar tomonidan saponit asosidagi tabiiy minerallarni modifikatsiyalash orqali ularning adsorbsion xossalarini oshirish va nodir yer elementlarini ajratib olishda qo‘llash imkoniyatlari chuqur o‘rganildi. Tadqiqot materiali sifatida Rossiyaning Arxangelsk viloyatida joylashgan Lomonosov kon-boyitish kombinatining chiqindi suvlaridan ajratib olingan saponit ishlatilgan. Bu mineral dastlab sentrifugalash usuli yordamida ajratilib, 60 °C da quritilgan va keyinchalik 160 mkm gacha maydalangan.

Keyingi bosqichda saponit namunalariga turli xil ishlov berish usullari qo‘llanilgan. Birinchi bosqichda termik modifikatsiya amalga oshirilib, namunalar 625 °C haroratda 2 soat davomida mufel pechida qizdirilgan. Ikkinchi bosqichda esa kimyoviy modifikatsiya – ya’ni temir ionlari yordamida pillaring jarayoni bajarilgan. Bunda Fe^{2+} va Fe^{3+} ionlari ishtirokida magnetit (Fe_3O_4) hosil qilinib, saponit strukturasiga kiritilgan.

Jarayon quyidagi reaksiyaga asoslanadi:

$$\mathbf{Fe^{2+} + 2Fe^{3+} + 8OH^- \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2O}$$

Natijada saponitning qatlamlari kengayib, qo‘shimcha aktiv markazlar hosil bo‘ladi va bu uning adsorbsion xossalarini sezilarli darajada oshiradi.

Natijalar va muhokama. Tadqiqot davomida uch xil namunalar solishtirildi: tabiiy saponit (Sap), termik modifikatsiyalangan saponit (Sap_625) va temir bilan modifikatsiyalangan saponit (Sap_Fe_625). Ularning adsorbsion xossalari 1-jadvalda keltirilgan.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.44

1-jadval

Saponit namunalarining adsorbsion sig‘imi

Namuna	Adsorbsion sig‘im (mg/g)
Tabiiy saponit	4,0 – 5,3
Termik modif. saponit	10,3 – 14,4
Fe bilan modif. sap	12,8 – 18,8

Natijalardan ko‘rinib turibdiki, eng yuqori adsorbsion sig‘im temir bilan modifikatsiyalangan namunada kuzatilgan (1-rasm).

Tadqiqotda shuningdek adsorbsiya jarayoniga ta’sir etuvchi asosiy parametrlar ham o‘rganilgan. pH qiymati muhim rol o‘ynashi aniqlanib, optimal pH = 4,1 deb topilgan. pH oshishi bilan eritmada nodir yer elementlarining karbonat shakllari hosil bo‘lishi va cho‘kishi tufayli adsorbsiya samaradorligi kamayishi kuzatilgan. Kontakt vaqti ta’siri ham o‘rganilib, dastlabki 4 soatda adsorbsiya jarayoni juda tez kechishi, keyinchalik esa muvozanat holati yuzaga kelishi aniqlangan. Sorbent va eritma nisbati ham muhim omil bo‘lib, optimal qiymat sifatida 1:33 tanlangan.

Elektron mikroskopiya tahlillari natijasida modifikatsiyalangan saponit yuzasida yangi strukturalar va nodir yer elementlari bilan boyigan mikroinklyuziyalar hosil bo‘lgani aniqlangan. Bu esa adsorbsiya jarayonining samarali kechishini tasdiqlaydi. Olingan natijalarga ko‘ra, modifikatsiyalangan saponitlar ayniqsa og‘ir nodir yer elementlarini (Yb, Lu, Tm) yuqori samaradorlik bilan adsorbsiyalashi aniqlangan. Ayrim hollarda ularning ajratib olish darajasi 99,5–99,9 % gacha yetgan.



Rasm 1. Modifikatsiyalangan namunalarning ko'rinishi: (a) Saponit; (b) Termik modifikatsiyalangan saponit (Saponit_625); (c) Temir bilan modifikatsiyalangan saponit

1-rasm. Modifikatsiyalangan saponitlarda adsorbsiya samaradorligining ortishi

Xulosa. O‘tkazilgan tadqiqotlar natijasida Lomonosov kon-boyitish kombinatining chiqindi suvlaridan ajratib olingan saponit mineralini termik va kimyoviy modifikatsiyalash orqali yuqori adsorbsion xususiyatlarga ega samarali sorbent olish mumkinligi aniqlandi. Termik ishlov berish (625 °C) hamda temir ionlari yordamida modifikatsiyalash saponitning adsorbsion faolligini sezilarli darajada oshirishi kuzatildi.

Tadqiqot natijalariga ko‘ra, tabiiy saponitning adsorbsion sig‘imi 4,0–5,3 mg/g ni tashkil etgan bo‘lsa, termik modifikatsiyadan so‘ng bu ko‘rsatkich 10,3–14,4 mg/g gacha, temir bilan modifikatsiyalangan namunada esa 12,8–18,8 mg/g gacha oshdi. Bu esa temir asosida modifikatsiyalash usulining sorbent xususiyatlarini yaxshilashda yuqori samaradorlikka ega ekanligini tasdiqlaydi.

Shuningdek, adsorbsiya jarayonining optimal parametrlari pH = 4,1, kontakt vaqti 4 soat hamda sorbent va eritma nisbati 1:33 ekanligi belgilandi. Mazkur sharoitlarda nodir yer

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.44

elementlarini ajratib olish samaradorligi 99 % gacha yetishi aniqlandi. Ayniqsa, itterbiy (Yb), lyutetsiy (Lu) va tuliy (Tm) kabi og‘ir nodir yer elementlariga nisbatan yuqori adsorbsion faollik namoyon bo‘ldi.

Umuman olganda, modifikatsiyalangan saponit tabiiy mineral xomashyo va sanoat chiqindilaridan samarali foydalanish, nodir yer elementlarini ajratib olish hamda oqova suvlarni zararli komponentlardan tozalash uchun istiqbolli sorbent hisoblanadi. Olingan ilmiy natijalar ushbu materialni gidrometallurgiya va ekologik tozalash texnologiyalarida qo‘llash imkoniyatlari mavjudligini ko‘rsatadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Anastopoulos I., Bhatnagar A., Lima E.C. Adsorption of rare earth metals: a review of recent literature // Journal of Molecular Liquids. – 2016. – Vol. 221. – P. 954–962. – DOI: 10.1016/j.molliq.2016.06.076.

2. Iannicelli-Zubiani E.M., Cristiani C., Dotelli G., Gallo Stampino P., Pelosato R., Mesto E., Schingaro E., Lacalamita M. Use of natural clays as sorbent materials for rare earth ions: materials characterization and set up of the operative parameters // Waste Management. – 2015. – Vol. 46. – P. 546–556. – DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.017.

3. Wu Z. et al. Review of rare earth element (REE) adsorption on and desorption from clay minerals: application to formation and mining of ion-adsorption REE deposits // Ore Geology Reviews. – 2023. – Vol. 157. – 105446. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105446.

4. Russo S.C., González-Álvarez I., Cocker H.A., McCoy-West A.J. The fundamentals of rare earth element ion adsorption clay deposits: a mineral systems approach for exploration // Journal of Geochemical Exploration. – 2025. – Vol. 278. – 107845. – DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107845.

5. Villanova-de-Benavent C., Smith M.P., Lyons P., Marquis E. Rare earth element adsorption experiments onto kaolinite in water, NaCl, Na_2SO_4 and $NaHCO_3$ solutions: implications regarding ion adsorption rare earth element deposit formation // Clay Minerals. – 2026. – Vol. 61. – P. 1–17. – DOI: 10.1180/clm.2026.10021.

6. Bishop B.A., Alam M.S., Flynn S.L., Chen N., Hao W., Shivakumar K.R., Swaren L., Gutierrez Rueda D., Konhauser K.O., Alessi D.S., Robbins L.J. Rare earth element adsorption to clay minerals: mechanistic insights and implications for recovery from secondary sources // Environmental Science & Technology. – 2024. – Vol. 58, № 16. – P. 7217–7227. – DOI: 10.1021/acs.est.4c00974.

7. Liu X., Tournassat C., Grangeon S., Kalinichev A.G., Takahashi Y., Marques Fernandes M. Molecular-level understanding of metal ion retention in clay-rich materials // Nature Reviews Earth & Environment. – 2022. – Vol. 3. – P. 461–476.

8. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. (eds.). Handbook of clay science. – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2013.

9. Pirnazarov F.G. Mahalliy saponit minerali asosida magniy xlorid va xloratlarini olish texnologiyasini ishlab chiqish: texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati. – Navoiy, 2025.

10. Umirov F.E., Muzaffarov A.M., Pirnazarov F.G., Umirov U.F. Изучение химического состава и свойств минерала сапонита // Горный вестник Узбекистана. – 2020. – № 3 (82). – С. 75–78.

11. Umirov F.E., Pirnazarov F.G. Studying the composition of local raw material saponite mineral rich in magnesium oxide and recovering chloride-chlorate from it // The American Journal of Engineering and Technology. – 2023. – P. 13–20.

12. Pirnazarov F.G., Umirov F.E. Konversiya yo‘li bilan saponit mineralini qayta ishlash // Studying the Progress of Science and Its Shortcomings. – 2024. – Vol. 1, № 2.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.44

13. Umirov F.E., Pirnazarov F.G., Qurbonov M.N. Saponit mineralini konversiya yo‘li bilan qayta ishlash texnologiyasini ishlab chiqish // Sanoatda raqamli texnologiyalar. – 2025. – Jild 3, № 1. – B. 74–79.

14. Umirov F.E., Aripov A.R., Pirnazarov F.G., Saifullaev F.I. Uchtut konidan olingan saponit mineralining mineralogik tarkibi va undan magniy birikmalarini ajratib olish imkoniyatlari // Sanoatda raqamli texnologiyalar. – 2025. – Jild 3, № 4. – B. 20–25. – DOI: 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.18.