Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

G‘OVAKLI ORGANOSILIKAT FOSFORILLANGAN ION ALMASHINUVCHILARNI SOL–GEL USULIDA SINTEZ QILISH VA ULARNING O‘ZBEKISTON OQAVA SUVLARINI TOZALASHDAGI ISTIQBOLLARI

Qudratova Dilnoza Mahmudovna
Osiyo xalqaro universiteti
o‘qituvchisi, Buxoro, O‘zbekiston
https://doi.org/10.5281/zenodo.23285475

Annotatsiya. Maqolada g‘ovakli organosilikat matritsaga fosfor saqlovchi kislotali guruhlar kiritilgan ion almashinuvchi materiallarni sol–gel usulida olishning amaliy jihatlari, ularni tavsiflash usullari va sorbsion jarayonni tavsiflovchi matematik modellar ko‘rib chiqilgan. Ion almashinuv mexanizmi fosfor guruhlarining kislotali xossalari asosida izohlangan, ustunli (kolonnali) tozalash sxemasi taklif etilgan. Mavzuning O‘zbekiston uchun dolzarbligi xalqaro tashkilotlar va milliy tadqiqotlar ma’lumotlari bilan asoslangan: mamlakatda suv olishning taxminan 90 foizi qishloq xo‘jaligiga sarflanadi, ishlatiladigan suvning taxminan 80 foizi qo‘shni yuqori oqim davlatlarida shakllanadi, sug‘orishda tuproq kanallarida yo‘qotilgan suv hajmi 14 mlrd m³ (36 foiz) deb e’lon qilingan, Olmaliq sanoat hududi tuproqlarida hamda Zarafshon va Ohangaron daryolarida og‘ir metallar bilan ifloslanish qayd etilgan. Maqola sharhiy xarakterga ega; mahalliy sharoitda sinovdan o‘tgan natijalar keltirilmagan, balki keyingi tajriba ishlari uchun ilmiy asos shakllantirilgan.
Kalit so‘zlar: sol–gel usuli; organosilikat; fosforillangan ion almashinuvchi; og‘ir metallar; oqava suvlar; adsorbsiya izotermasi; O‘zbekiston

O‘zbekiston Respublikasi suv resurslari jihatidan murakkab sharoitda joylashgan: mamlakat Amudaryo va Sirdaryo havzalarining quyi qismida joylashgan bo‘lib, ishlatiladigan suvning katta qismi qo‘shni davlatlar hududida shakllanadi. Bunday vaziyatda suvning miqdori bilan birga uning sifati ham strategik ahamiyat kasb etadi. Sanoat va maishiy oqava suvlar tarkibidagi mis, rux, qo‘rg‘oshin, kadmiy kabi og‘ir metallarni samarali ajratib oladigan sorbentlarga ehtiyoj shu sababli ortib bormoqda.

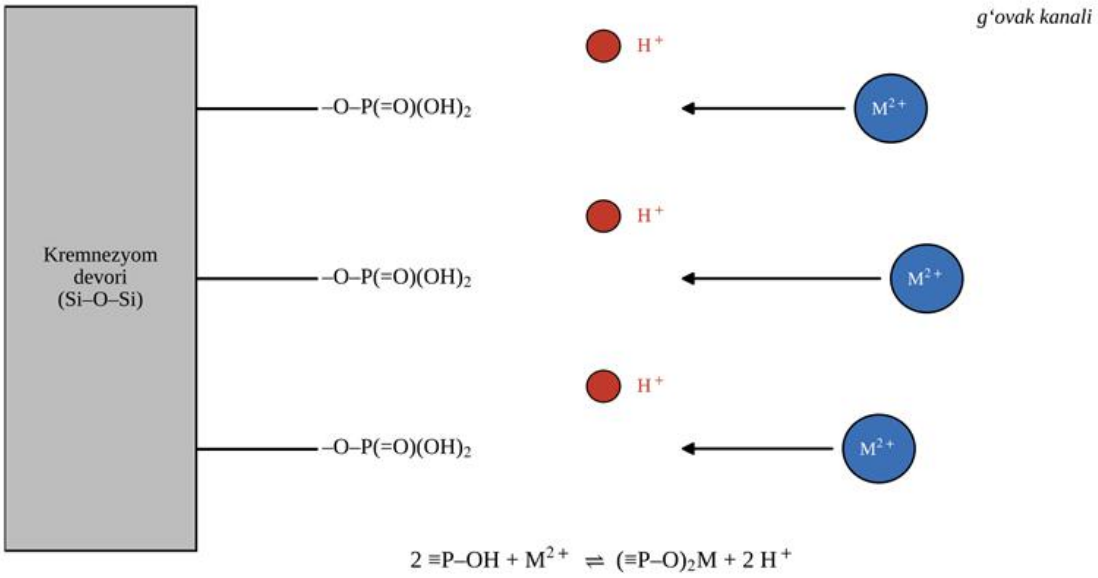
Ion almashinuvchi materiallar bu vazifada an’anaviy usullar — kimyoviy cho‘ktirish va koagulyatsiyadan — farqli o‘laroq, metallni tanlab ushlab qoladi va regeneratsiyadan keyin qayta ishlatilishi mumkin. Sol–gel usuli esa bunday materiallarni nisbatan yumshoq sharoitda, organik guruhlarni zararlamasdan olish imkonini beradi. Maqolaning maqsadi g‘ovakli organosilikat asosdagi fosforillangan ion almashinuvchilarning ishlash tamoyilini, ularni o‘rganish usullarini va oqava suvlarni tozalashdagi qo‘llanilish shartlarini O‘zbekiston misolida bayon etishdan iborat.

Fosfonat guruhi $–P(=O)(OH)_2$ ikki bosqichda dissotsiatsiyalanadigan kislota hisoblanadi, shu bois uning ion almashinuv qobiliyati muhitning pH qiymatiga kuchli bog‘liq. Kuchli kislotali muhitda guruhlar asosan protonlangan holda qoladi va faqat yuqori afinlikka ega kationlar almashinuvga kirishadi; pH ortishi bilan dissotsiatsiya kuchayadi va sorbsion sig‘im oshadi. Ikki valentli metall ioni M^{2+} uchun jarayonni 1-rasmda ko‘rsatilgan sxema va quyidagi tenglama bilan ifodalash mumkin:

$$2 \equiv P\text{–}OH + M^{2+} \rightleftharpoons (\equiv P\text{–}O)_2M + 2\ H^+$$

Bu yerda ajralib chiqadigan protonlar eritma pH ini pasaytiradi, shu sababli nazariy jihatdan ion almashinuv muvozanati kislotali muhitda chapga siljiydi. Aynan shu xususiyat regeneratsiyaning asosini tashkil qiladi: to‘yingan sorbent kislota eritmasi bilan yuvilganda metall chiqib ketadi, sorbent esa H^+ shakliga qaytadi.

1-rasm.



Kremnezyom devoriga bog‘langan fosfonat guruhlarida ikki valentli metall ionining (M^{2+}) almashinuv sxemasi. Chizma tasviriy xarakterga ega va masshtabga rioya qilinmagan.

Materialning asosiy miqdoriy tavsifi ion almashinuv sig‘imi (IAS) hisoblanadi. Agar namunaning 1 g ida n_P mmol fosfor bo‘lib, har bir fosfor atomi z ta almashinuvchi protonga ega bo‘lsa, nazariy yuqori chegara quyidagicha topiladi:

$$IAS_{max} = z \cdot n_P \ (mekv/g) \qquad (2)$$

Misol uchun (faqat hisob-kitob namunasi sifatida): 2,0 mmol P/g saqlagan va z = 2 deb olingan material uchun IAS_{max} = 4,0 mekv/g bo‘ladi. Amalda bu qiymatga erishilmaydi, chunki fosfor guruhlarining bir qismi devor ichida joylashgan yoki g‘ovak kirishidan to‘silgan bo‘ladi. Shu sababli tajribada aniqlangan sig‘imning nazariy qiymatga nisbati sintez sifatining ko‘rsatkichi sifatida ishlatiladi.

Mezog‘ovakli kremnezyomni funksional guruhlar bilan modifikatsiyalash g‘oyasi og‘ir metallarni ajratishda dastlab oltingugurt saqlovchi (merkaptopropil) guruhlar misolida simob ionlari uchun ishlab chiqilgan; bu ishlar g‘ovak tuzilishining bir xilligi sorbent ichiga ionlar kirishini yaxshilashini ko‘rsatdi. Fosforli guruhlar xuddi shu yondashuvni kationlar uchun kengaytiradi. Kimyoviy jihatdan yaqin tizimlarda, masalan, qalay(IV) silikofosfat asosidagi kompozitda kadmiy(II) ioniga nisbatan tanlab ushlash kuzatilgan, sol–gel usulidagi g‘ovakli magniy gidroksid esa qo‘rg‘oshin(II) adsorbsiyasida sinalgan.

Laboratoriya sharoitida jarayon odatda quyidagi izchillikda olib boriladi. Avval kremniy alkoksidi (masalan, TEOS) va fosfor saqlovchi organosilan spirtli erituvchida aralashtiriladi, so‘ng kislotali katalizator bilan suv qo‘shilib gidroliz boshlanadi. G‘ovak hosil qiluvchi sifatida sirt-faol modda yoki blok-sopolimer kiritilsa, kondensatsiya shu mitsellalar atrofida kechadi. Hosil bo‘lgan gel yetiltiriladi, quritiladi, shablon organik erituvchi bilan ekstraksiya qilinadi, fosfor guruhlaridagi efir qoldiqlari

kislotali gidroliz orqali ajratiladi va material H^+ shakliga o‘tkaziladi. Kalsinlash, kremnezyom uchun odatiy bo‘lsa-da, organik guruhlarni oksidlab yuborishi mumkinligi sababli bunday gibrid materiallar uchun tavsiya etilmaydi.

Olingan materialning sifati bir necha mustaqil usul bilan tekshiriladi. Ularning qisqacha xarakteristikasi 1-jadvalda berilgan. Ayniqsa ^{31}P yadro magnit-rezonans spektroskopiyasi muhim, chunki u fosforning kimyoviy muhitini ajratib ko‘rsatadi: fosfor tarmoqqa chinakam bog‘langanmi yoki erkin fosfat holida qolganmi, shu usul orqali baholanadi.

1-jadval. Fosforillangan organosilikat ion almashinuvchilarni tavsiflashning asosiy usullari.

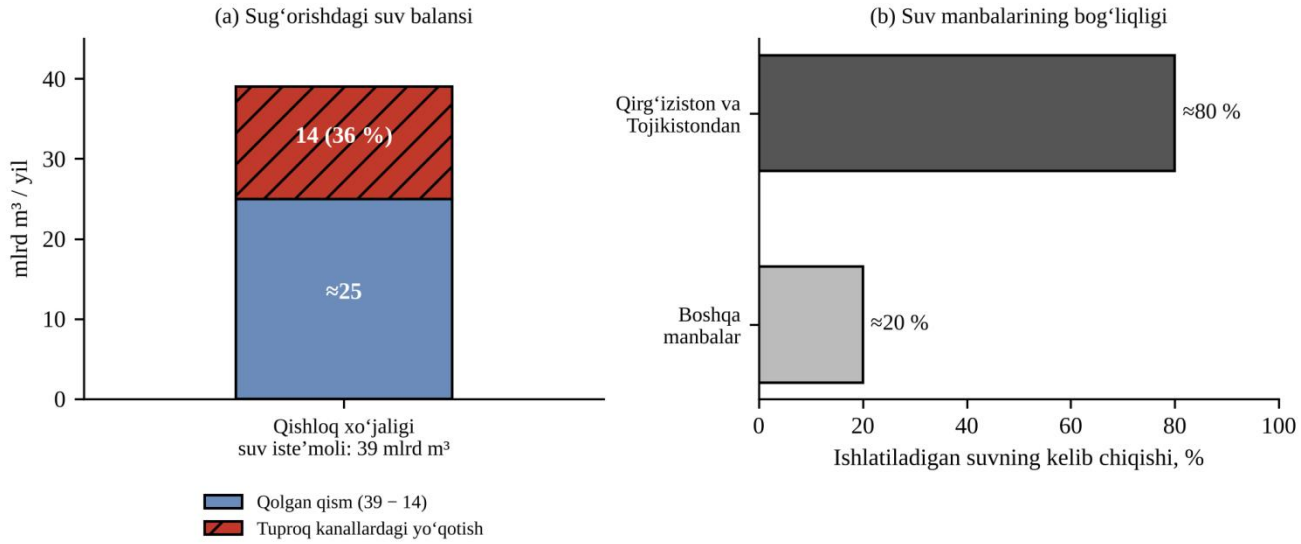
Usul	Nimani aniqlaydi	Ion almashinuvdagi ahamiyati
Azotning past haroratli adsorbsiyasi (BET, BJH)	Solishtirma sirt, g‘ovak hajmi va o‘lchami taqsimoti	Ionlar uchun yo‘l ochiq ekanligini ko‘rsatadi
^{31}P MAS YaMR	Fosforning kimyoviy muhiti	Fosfor tarmoqqa bog‘langanmi yoki erkin ekanini ajratadi
FTIR spektroskopiya	Si–O–Si, P=O, P–OH tebranishlari	Funksional guruhlar mavjudligini tasdiqlaydi
Termogravimetriya (TGA)	Organik qismning miqdori va termik barqarorligi	Ishlash harorati chegarasini belgilaydi
Titrimetriya (kislota–asos)	Almashinuvchi H^+ miqdori, ya’ni IAS	Sig‘imning to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘lchovi
AAS yoki ICP-OES	Eritmadagi metall konsentratsiyasi	Adsorbsiya va tanlovchanlikni hisoblash uchun asos

Jadval muallif tomonidan umumiy analitik kimyo amaliyoti asosida tuzilgan.

Oziq-ovqat va qishloq xo‘jaligi tashkiloti (FAO) ma’lumotlariga ko‘ra, O‘zbekistonda umumiy suv olishning taxminan 90 foizi qishloq xo‘jaligi hissasiga to‘g‘ri keladi; BMTning “Suv” hisobotida FAO ma’lumotiga tayanib bu ko‘rsatkich 92 foiz deb keltirilgan. Mamlakatda ishlatiladigan suv resurslarining taxminan 80 foizi Qirg‘iziston va Tojikistonda shakllanadi, shuning uchun bu davlatlarning suv siyosati O‘zbekistonga yetib keladigan suvning miqdori va mavsumiy taqsimotiga bevosita ta’sir qiladi. O‘zbekiston hududining o‘zida Amudaryo oqimining atigi 4,7 km^3/yil (taxminan 6 foiz), Sirdaryo oqimining 4,84 km^3/yil (taxminan 13 foiz) qismi hosil bo‘ladi. Katta suv olish va yo‘qotishlar tufayli Orol dengiziga yetib boradigan oqim Amudaryoda eng qurg‘oqchil yillarda 10 foizdan, Sirdaryoda 5 foizdan kam bo‘lgan; Orol dengizi inqirozining ilmiy tahlili bu holatning ekologik oqibatlarini batafsil ko‘rsatgan.

2023-yil oktyabr oyida bildirilgan rasmiy ma’lumotga ko‘ra, qishloq xo‘jaligida bir yil davomida 39 mlrd m^3 suv iste’mol qilingan, shundan 14 mlrd m^3 (36 foiz) tuproq kanallarda yo‘qotilgan; yerlarning 70 foizi hanuz eskirgan usullarda sug‘orilgan, 5–6 mlrd m^3 suv foydalanilmay kollektorlarga tashlangan. Suv xo‘jaligi vazirligi birinchi o‘rinbosarining prognoziga ko‘ra, 2030-yilga borib mamlakatda 7 mlrd m^3 suv yetishmasligi kutilmoqda. Bu qiymatlar 2-rasm va 2-jadvalda jamlangan. Ma’lumotlar turli tashkilotlar tomonidan turli yillarda e’lon qilinganligi sababli, ularni yagona vaqt

kesimidagi statistika sifatida emas, balki muammo ko‘lamini ko‘rsatuvchi ma’lumotlar sifatida qabul qilish lozim.



2-rasm. Sug‘orishdagi suv balansi va suv manbalarining bog‘liqligi: (a) qishloq xo‘jaligida iste’mol qilingan 39 mlrd m³ suvdan tuproq kanallarda yo‘qotilgan qism; (b) ishlatiladigan suvning qo‘shni yuqori oqim davlatlarida shakllanadigan taxminiy ulushi. Manba: FAO va rasmiy matbuot ma’lumotlari asosida muallif tuzgan.

2-jadval. O‘zbekiston suv resurslari bo‘yicha tanlangan ko‘rsatkichlar.

Ko‘rsatkich	Qiymat	Ma’lumot manbasi
Qishloq xo‘jaligining umumiy suv olishdagi ulushi	≈ 90 % (≈ 92 %)	FAO; Jahon banki; BMT-Suv
Ishlatiladigan suvning Qirg‘iziston va Tojikistonda shakllanadigan ulushi	≈ 80 %	FAO
Amudaryo oqimining O‘zbekistonda hosil bo‘ladigan qismi	4,7 km³/yil (≈ 6 %)	FAO AQUASTAT
Sirdaryo oqimining O‘zbekistonda hosil bo‘ladigan qismi	4,84 km³/yil (≈ 13 %)	FAO AQUASTAT
Qishloq xo‘jaligi suv iste’moli (2023-yil oktyabrda e’lon qilingan yillik ko‘rsatkich)	39 mlrd m³	Prezident yig‘ilishi ma’lumoti
Tuproq kanallarda yo‘qotilgan suv	14 mlrd m³ (36 %)	Xuddi shu manba
Eskirgan usulda sug‘oriladigan yer ulushi	70%	Xuddi shu manba
2030-yilga prognoz qilingan suv tanqisligi	7 mlrd m³	Suv xo‘jaligi vazirligi

Qiymatlar manbalarda e’lon qilingan ko‘rinishda keltirilgan; mustaqil tekshirilmagan.

Suv tanqisligi sharoitida suv sifati yanada kritik bo‘lib qoladi, chunki ifloslangan oqava suvlarning daryolarga tushishi mavjud resursni ishlatishga yaroqsiz qilib qo‘yadi. O‘zbekistonda og‘ir metallar bo‘yicha olib borilgan mahalliy tadqiqotlar 3-jadvalda umumlashtirilgan. Olmaliq tog-metallurgiya majmuasi atrofidagi tuproqlarni o‘rgangan O. Qodirov 17 ta element (Cu, Zn, Pb, Sc, V, Cr, Co, Ni, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Th, U) taqsimotini 21 ta nuqtada, jami 63 ta tuproq namunasida rentgen-

floressent usuli bilan aniqlagan; namunalar beshta radial transekt bo‘ylab, umumiy uzunligi 60 km bo‘lgan shamol yo‘nalishi gradientida olingan. Mis, rux va qo‘rg‘oshin miqdori manbadan uzoqlashgan sari sezilarli kamaygan, majmua esa bu elementlar bilan boyishning asosiy manbai deb baholangan.

Suv obyektlari bo‘yicha ham shunga o‘xshash holat qayd etilgan. Zarafshon daryosining og‘ir metallar bilan ifloslanishi 11 ta kuzatuv punktida o‘rganilgan va geoaxborot tizimi yordamida xaritalashtirilgan; ifloslanish sanoat, qishloq xo‘jaligi va maishiy oqava suvlar bilan bog‘liq bo‘lib, Samarqand va Navoiy shaharlari oqavalari ta’siri kuchli deb ko‘rsatilgan. Ohangaron daryosi bo‘yicha tadqiqotda Olmaliq majmuasi oqava suvlari tushirilgan joydan pastda daryo suvi turli metall ionlari bilan ifloslangani aniqlangan. Chirchiq havzasida esa Toshkent, Chirchiq, Yangiyo‘l kabi yirik sanoat markazlarining antropogen bosimi ta’kidlanadi, daryo suvi markazlashgan ichimlik suvi ta’minotida ishlatiladi. Shuni alohida qayd etish kerakki, bu manbalarning bir qismi konferensiya yoki ilmiy-ommabop maqolalar bo‘lib, ularning natijalari asosida umumlashtirilgan statistik xulosa chiqarib bo‘lmaydi.

3-jadval. O‘zbekistonda og‘ir metallar bilan ifloslanish bo‘yicha tanlangan tadqiqotlar.

Obyekt	**O‘rganilgan elementlar va hajm**	**Asosiy kuzatuv**
Olmaliq sanoat hududi tuprog‘i	17 element; 21 nuqta, 63 namuna; 5 transekt, jami 60 km	Cu, Zn, Pb manbadan uzoqlashgan sari kamayadi; majmua asosiy manba
Zarafshon daryosi	Cu, Zn, Mn, Ni, Cr(VI, III), Pb, Cd, Hg; 11 kuzatuv punkti	Sanoat, qishloq xo‘jaligi va maishiy oqavalar ta’siri; GAT xaritasi tuzilgan
Ohangaron daryosi	Metall ionlari	Oqava tushirilgan joydan pastda suv metall ionlari bilan ifloslangan
Chirchiq daryosi havzasi	Gidrokimyoviy xarakteristikalar	Yirik shaharlar va sanoat markazlarining antropogen bosimi
Olmaliq majmuasi atrofidagi tuproq va o‘simliklar (2024)	Tuproq va o‘simlik tarkibi	Sanoat korxonalari ta’sirida ekologik holat o‘zgargan

Jadval ochiq nashrlardagi ma’lumotlar asosida tuzilgan; qiymatlar muallif tomonidan qayta hisoblanmagan.

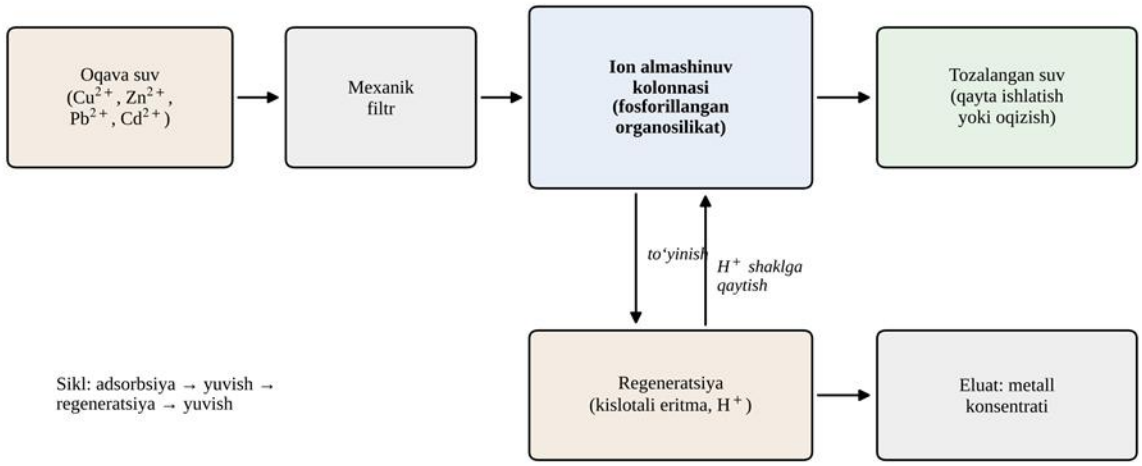
Yangi sorbentning amaliy qiymatini baholash uchun muvozanat va kinetika tajribalari o‘tkaziladi. Muvozanat holati adsorbsiya izotermalari bilan, jarayon tezligi esa kinetik modellar bilan tavsiflanadi. Ularning chiziqli ko‘rinishlari 4-jadvalda keltirilgan. Eng ko‘p qo‘llaniladigan Lengmyur modeli sirtda bir qavatli adsorbsiyani nazarda tutadi va q_m parametri orqali maksimal sig‘imni beradi; psevdo-ikkinchi tartibli kinetik model esa tezlikni chegaralovchi bosqichni kimyoviy bog‘lanish deb hisoblaydi va ion almashinuv tizimlarida keng ishlatiladi.

4-jadval. Sorbsiya jarayonini tavsiflashda ishlatiladigan asosiy modellar.

Model	Chiziqli tenglama	Parametrlar
Lengmyur izotermasi	$C_e/q_e = 1/(q_mK_L) + C_e/q_m$	q_m — maksimal sig‘im, mg/g; K_L — afinlik doimiysi, L/mg
Freyndlix izotermasi	$\ln q_e = \ln K_F + (1/n) \ln C_e$	K_F, n — empirik doimiylar
Psevdo-birinchi tartibli kinetika	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1t$	k_1 — tezlik doimiysi, 1/min
Psevdo-ikkinchi tartibli kinetika	$t/q_t = 1/(k_2q_e^2) + t/q_e$	k_2 — tezlik doimiysi, g/(mg·min)
Taqsimlanish koeffitsiyenti	$K_d = [(C_0 - C_e)/C_e] \cdot (V/m)$	V — eritma hajmi, mL; m — sorbent massasi, g

C_0, C_e — boshlang‘ich va muvozanat konsentratsiyalar; q_e, q_t — muvozanatda va t vaqtda adsorbsiyalangan miqdor (mg/g).

Real sharoitda jarayon odatda ustunli (kolonnali) qurilmada amalga oshiriladi (3-rasm). Oqava suv avval mexanik filtrdan o‘tkazilib, muallaq zarrachalardan tozalanadi, so‘ng sorbent bilan to‘ldirilgan ustundan o‘tadi. Sorbent to‘yingach, kislotali eritma bilan regeneratsiya qilinadi; eluatda metall konsentrlangan holda olinadi va uni alohida qayta ishlash mumkin. Sikl ketma-ket adsorbsiya, yuvish, regeneratsiya va qayta yuvish bosqichlaridan iborat.



3-rasm. Fosforillangan organosilikat sorbentli ustunda og‘ir metall ionlarini ajratib olish va sorbentni regeneratsiya qilish sxemasi (taklif etilayotgan texnologik yechim).

Yuqorida keltirilgan ma’lumotlar shuni ko‘rsatadiki, O‘zbekistonda suv resurslarining cheklanganligi va sanoat hududlari atrofida og‘ir metallar bilan ifloslanish holatlari ion almashinuvchi sorbentlarni sinash uchun real asos yaratadi. Biroq laboratoriya natijalarini ishlab chiqarishga o‘tkazishda bir necha omilni hisobga olish zarur. Birinchidan, tabiiy va oqava suvlarda kalsiy, magniy va natriy kabi raqobatchi ionlar ko‘p bo‘lishi mumkin, shu sababli sorbentning tanlovchanligi toza metall eritmalarida emas, balki real tarkibli suvda tekshirilishi kerak. Ikkinchidan, fosfor guruhlarining eritmaga chiqib ketishi (leaching) va ko‘p martalik regeneratsiyadan keyingi sig‘im sorbentning asosiy tavsiflari qatoriga kiritilishi lozim. Uchinchidan, iqtisodiy jihat: fosforli organosilan prekursorlari

an’anaviy ion almashinuvchi smolalarga nisbatan qimmatroq bo‘lishi mumkin, shuning uchun bunday sorbentlar, birinchi navbatda, qimmatbaho yoki xavfli komponentlarni ajratib olishda oqlanishi mumkin.

O‘z navbatida, sol–gel usuli materialni turli shaklda — kukun, monolit, yupqa qatlam — olish imkonini beradi. Xuddi shu usul boshqa sohalarda, masalan, ionogellar yordamida suyuq eritmalardan litiyni tanlab ajratib olishda ham qo‘llanilgan. Mazkur ishda bunday natijalar mahalliy xomashyo yoki oqava suvlar uchun sinalmagani sababli, ularni faqat yondashuvning universalligiga misol sifatida ko‘rish kerak.

Sol–gel usuli g‘ovakli kremnezyom karkasiga kislotali fosfor guruhlarini kovalent bog‘langan holda kiritish va ularning taqsimotini boshqarish imkonini beradi. Ion almashinuv jarayoni fosfor guruhlarining dissotsiatsiyasiga asoslanadi va pH hamda raqobatchi ionlar mavjudligiga bog‘liq. Materialni baholashda g‘ovak tuzilishi, fosforning kimyoviy muhiti, ion almashinuv sig‘imi va regeneratsiyadan keyingi barqarorlik mustaqil usullar bilan tekshirilishi kerak. O‘zbekiston uchun mavzu qishloq xo‘jaligining yuqori suv iste’moli, suv manbalarining qo‘shni davlatlarga bog‘liqligi va Olmaliq, Zarafshon, Ohangaron hududlarida qayd etilgan og‘ir metall ifloslanishi tufayli dolzarbdir. Keyingi qadam sifatida real oqava suv namunalarida sorbentning sig‘imi, tanlovchanligi va regeneratsiya sikllarini aniqlovchi tajribalarni o‘tkazish tavsiya etiladi.

Adabiyotlar:

1. FAO AQUASTAT. Uzbekistan: country profile — water resources and use. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/w6240e/w6240e20.htm
2. FAO. Uzbekistan country review, FAO publication y5082e (section on water use and irrigated agriculture). https://www.fao.org/3/y5082e/y5082e0f.htm
3. FAO and Türkiye Partnership. Promotion of water saving technologies in the Uzbek water scarce area of the transboundary Podshaota river basin. https://www.fao.org/in-action/fao-turkey-partnership/projects/project-detail/en/c/1365124/
4. World Bank. Project document P149610, Uzbekistan (Ministry of Agriculture and Water Resources). https://ewsdata.rightsindevelopment.org/files/documents/10/WB-P149610_dtYglvm.pdf
5. Central Asia Climate Portal (2023). 36% of water in Uzbekistan’s agriculture is lost in earthen canals (after Gazeta.uz, 20 October 2023). https://centralasiaclimateportal.org/36-of-water-in-uzbekistans-agriculture-is-lost-in-earthen-canals/
6. Times of Central Asia. UN: Uzbekistan makes major progress in reducing water stress, but challenges remain (report of UN-Water). https://timesca.com/un-uzbekistan-makes-major-progress-in-reducing-water-stress-but-challenges-remain/
7. Micklin, P. (2007). The Aral Sea disaster. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 35, 47–72.
8. Kodirov, O. (2009). Heavy metal distribution in soils near the Almalyk mining and smelting industrial area, Uzbekistan. Acta Geologica Sinica (publication record: https://scienceweb.uz/publication/169).
9. Mapping of heavy metal pollution of the Zeravshan River along the length of the river. CyberLeninka. https://cyberleninka.ru/article/n/mapping-of-heavy-metal-pollution-of-the-zeravshan-river-along-the-length-of-the-river

10. The influence of the Almalyk Mining and Metallurgical Combine on the hydroecological condition of the Akhangaran River (2024). Zenodo. https://zenodo.org/records/11059617
11. Changes in the environmental condition of soil and plants under the influence of industrial enterprises (in the case of the Almalyk Mining and Metallurgical Combine) (2024). E3S Web of Conferences, 539, 01020. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453901020
12. Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers. Study on the Chirchik River basin: hydrological and hydrochemical characteristics and anthropogenic pressure. https://staff.tiiame.uz/storage/users/130/articles/2fEXZiwvoKdJ8VgycCJ4LQBTuAMnlveVkDXQdGTR.pdf
13. Feng, X., Fryxell, G. E., Wang, L.-Q., Kim, A. Y., Liu, J., & Kemner, K. M. (1997). Functionalized monolayers on ordered mesoporous supports. Science, 276, 923–926.
14. Mercier, L., & Pinnavaia, T. J. (1997). Access in mesoporous materials: advantages of a uniform pore structure in the design of a heavy metal ion adsorbent for environmental remediation. Advanced Materials, 9, 500–503.
15. Khan, M. D. A., & Nabi, S. A. (2023). Selective removal of Cd(II) ion using synthesised poly(o-anisidine)–Sn(IV) silicophosphate nanocomposite. International Journal of Environmental & Analytical Chemistry.
16. Chen, G., Kang, Z., Ma, Y., Huang, X., Sun, X., & Wang, Q. (2025). Crosslinking ionic oligomers sol–gel synthesis of porous amorphous magnesium hydroxide and its application in Pb^{2+} adsorption. Journal of Solid State Chemistry.
17. Huang, Y., Li, X., Luo, G., Tao, D., Chen, L., Sun, J., … & Zhu, W. (2024). Selective extraction of lithium ions by phosphoroxy-functionalized ionogels from the mother liquor of Li_2CO_3. Chemical Engineering Journal.
18. Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society, 40, 1361–1403.
19. Freundlich, H. (1906). Über die Adsorption in Lösungen. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 57, 385–470.
20. Lagergren, S. (1898). Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, 24(4), 1–39.
21. Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 34, 451–465.
22. Helfferich, F. (1962). Ion Exchange. McGraw-Hill, New York.