



<https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i04.032>

UDK 541.183

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3370-1877>

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4339-9060>

SUVDAGI RUX (II) IONLARINING BIOSORBENTLARGA ADSORBSIYALANISHI, MUVOZANAT IZOTERMA MODELLARI TAHLILI

Abdirimova Madina Egamberganovna

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, magistri
egamberganovamadina9@gmail.com. Tel: +99893-754-90-30

Xonqulov Shoxrux Bahodirovich

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, doktoranti
shoxruxxonqulov6@gmail.com. Tel: +99890-972-11-36

Bekmirzayev Akbarbek Shuxratovich

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, doktoranti
akbarkimtex@gmail.com. Tel: +99897-724-26-27

Xandamov Davron Abdikodirovich

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, kimyo fanlari doktori, professor
davron.khandamov@gmail.com. Tel: +99897-345-04-82

Annotatsiya. Ushbu maqolada PBMB bentoniti va u asosida kislotali faollangan hamda xitozan bilan modifikatsiya qilib olingan adsorbentlarning olinish sharoitlari, ularga rux (II) ionlari adsorbsiyalanishining izotermalari turli modellar yordamida tahlil qilingan. Lengmyur modeli asosida aniqlangan maksimal adsorbsiya sig‘imi ($q_{\max}$) qiymatlari PBMB uchun 26,307 mg/g, PBMB10 uchun 27,553 mg/g va Xit-B uchun 66,225 mg/g ni tashkil etdi. Eksperimental natijalarga ko‘ra, PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlari uchun pH_{pzc} qiymatlari mos ravishda 8,43; 9,12 va 7,04 ga teng ekanligi aniqlandi. Eng yuqori adsorbsion sig‘im Xit-B biosorbentida qayd etilib, uning Zn^{2+} ionlarini adsorbsiyalash qobiliyati boshqa namunalar bilan solishtirganda ancha yuqori ekanligi aniqlandi. Bu bentonitni faollash va modifikasiyalash jarayonida struktural o‘zgarishlar adsorbsiya samaradorligini oshirishini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: Bentonit, modifikatsiya, oqova suv, rux ionlari, adsorbsiya izotermalari, adsorbsiyalanish modellari, nol zaryad nuqtasi.

Аннотация. В данной статье рассмотрены условия получения бентонита PBMB и адсорбентов, модифицированных на его основе кислотной активацией и хитозаном,

а также проведён анализ изотерм адсорбции ионов цинка (Zn^{2+}) с использованием различных моделей. Согласно результатам, полученным по модели Ленгмюра, максимальная адсорбционная ёмкость (q_{max}) составила 26,307 мг/г для PBMB, 27,553 мг/г для PBMB10 и 66,225 мг/г для Xit-B. Согласно экспериментальным результатам, значения pH_{pzc} для PBMB, PBMB10 и Xit-B составили 8,43; 9,12 и 7,04 соответственно. Наибольшая адсорбционная способность зафиксирована у биосорбента Xit-B, что свидетельствует о его более высокой эффективности по сравнению с другими образцами. Это указывает на то, что структурные изменения в процессе активации и модификации бентонита повышают эффективность адсорбции.

Ключевые слова: бентонит, модификация, сточные воды, ионы цинка, изотермы адсорбции, модели адсорбции, точка нулевого заряда.

Abstract. This article investigates the preparation conditions of PBMB bentonite and its acid-activated and chitosan-modified adsorbents, as well as the analysis of zinc ion (Zn^{2+}) adsorption isotherms using different models. According to the results obtained from the Langmuir model, the maximum adsorption capacity (q_{max}) was found to be 26.307 mg/g for PBMB, 27.553 mg/g for PBMB10, and 66.225 mg/g for Xit-B. According to the experimental results, the pH_{pzc} values for PBMB, PBMB10, and Xit-B were determined to be 8.43, 9.12, and 7.04, respectively. The highest adsorption capacity was observed for the Xit-B biosorbent, indicating its significantly higher efficiency compared to the other samples. This demonstrates that structural changes during the activation and modification of bentonite enhance adsorption performance.

Keywords: bentonite, modification, wastewater, zinc ions, adsorption isotherms, adsorption models, point of zero charge.

KIRISH. Bugungi kunda suv resurslarining og'ir metall ionlari, xususan rux (Zn^{2+}) bilan ifloslanishi jiddiy ekologik muammolardan biri hisoblanadi. Ushbu muammo atrof-muhitda metallarning ortib borayotgan konsentratsiyasi bilan bog'liq [1]. Sanoat chiqindilarini nazoratsiz chiqarish jarayonlari suv va tuproq ekotizimlarining sezilarli darajada ifloslanishiga olib kelib, global ekologik xavf darajasini oshirmoqda [2].

Ruxning asosiy antropogen manbalari orasida rangli metallurgiya, galvanik qoplamalar, shuningdek bo'yoqlar, plastmassa, kauchuk, kosmetika va farmatsevtika sanoati muhim o'rin tutadi [3]. Rux biologik ahamiyatga ega mikroelement bo'lib, past konsentratsiyalarda organizmning normal fiziologik jarayonlarida ishtirok etadi. Biroq uning ortiqcha miqdori toksik ta'sir ko'rsatib, inson salomatligi va ekologik tizimlar uchun xavf tug'diradi. Jahon sog'liqni saqlash tashkiloti (JSST) ichimlik suvida rux ionlarining maksimal ruxsat etilgan konsentratsiyasini 0,5 mg/L etib belgilagan [4]. Ushbu me'yordan yuqori konsentratsiyalarda Zn^{2+} ionlari biologik tizimlarga salbiy ta'sir ko'rsatadi [5].

Hozirgi kunda og'ir metall ionlarini suvdan tozalashda cho'ktirish, ion almashinuvi, membranali filtrlash va adsorbsiya kabi usullar qo'llanilmoqda. Ular orasida adsorbsiya

usuli yuqori samaradorligi, nisbatan past ekspluatatsion xarajatlari va texnologik soddaligi bilan ajralib turadi. Biosorbentlar tabiiy yoki biologik kelib chiqishga ega materiallar bo‘lib, ularning yuzasidagi funksional guruhlar og‘ir metall ionlarini bog‘lashda muhim rol o‘ynaydi. Ushbu ishda rux (II) ionlarining turli biosorbentlarga adsorbsiyalanish jarayoni, muvozanat holati hamda adsorbsiya izoterma modellari (Lengmyur, Freyndlix va boshqa modellar) asosida tahlil qilinadi.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODLAR. So‘nggi yillarda og‘ir metall ionlarini, xususan rux (Zn^{2+}) ionlarini suv muhitidan chiqarib tashlash muammosi ko‘plab tadqiqotchilar e‘tibor markazida bo‘lib kelmoqda. Adabiyot ma‘lumotlariga ko‘ra, Zn^{2+} ionlarini suvdan tozalashda adsorbsiya usuli eng samarali va istiqbolli yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Turli ilmiy ishlarda bentonit, faollashtirilgan ko‘mir, zeolit, biochar hamda xitosan asosidagi biosorbentlar keng qo‘llanilgan bo‘lib, ularning adsorbsiya samaradorligi 60–98 % oralig‘ida o‘zgarishi qayd etilgan [6].

Bir qator tadqiqotlarda bentonitning kislotali faollashtirilishi uning sirt maydonini sezilarli darajada oshirishi va adsorbsiya sig‘imini bir necha barobarga kuchaytirishi aniqlangan [7]. Shuningdek, xitosan bilan modifikatsiya qilingan adsorbentlar metall ionlarini kompleks hosil qilish orqali yanada yuqori bog‘lash qobiliyatiga ega ekanligi ko‘rsatilgan. Adabiyotlarda biosorbentlarning samaradorligi ularning sirtidagi –OH, –COOH va –NH₂ funksional guruhlar miqdoriga bevosita bog‘liqligi ta’kidlangan [8].

Adsorbentlarni sintez qilish. Xitozan eritmasini tayyorlash 2 g xitozan 2% li sirka kislotasi eritmasida eritish orqali gomogen eritma tayyorlandi. Buning uchun 2 ml sirka kislotasi 100 ml hajmli o‘lchov kolbasiga solinib, distillangan suv bilan 100 ml gacha to‘ldirildi. Olingan 2% li sirka kislotasi eritmasiga 2 g xitozan qo‘shildi va aralashma 30°C haroratda, 250 rpm tezlikda ishlaydigan magnitli aralashtirgichda 3 soat davomida doimiy aralashtirildi. Natijada xitozanning bir jinsli (gomogen) eritmasi hosil qilindi.

Bentonitni tayyorlash va faollashtirish. Bentonitni tayyorlash bir necha bosqichli jarayonni o‘z ichiga oladi. Dastlab zarracha o‘lchami 0,04 mm dan kichik bo‘lgan tabiiy bentonit 10% li sulfat kislota eritmasi bilan ishlov berildi. Ushbu bosqich bentonitning g‘ovak tuzilishini rivojlantirish hamda tarkibidagi noorganik va organik aralashmalarni kamaytirish maqsadida amalga oshirildi. Keyingi bosqichda kislotali ishlov berilgan bentonitdan 10 g miqdorda olinib, 200 ml distillangan suvda suspenziya holati hosil qilindi.

Bentonit–xitozan kompozitini olish. Tayyorlangan bentonit suspenziyasi va xitozan eritmasi 343 K haroratda 2 soat davomida uzluksiz aralashtirish sharoitida birlashtirildi. Ushbu jarayon natijasida bentonit va xitozan o‘rtasida struktural o‘zaro bog‘lanish hosil bo‘lib, kompozit tizim shakllandi. Hosil bo‘lgan aralashmaga 1 M konsentratsiyadagi NaOH eritmasidan 200 ml qo‘shildi. Ishqoriy muhit xitozanning eruvchanligini kamaytirib, gel hosil bo‘lish jarayonini faollashtirdi. Natijada bentonit asosidagi mustahkam gel struktura shakllanishi ta’minlandi. Bu bosqich kompozit materialning mexanik barqarorligi va strukturaviy mustahkamligini oshirishda muhim ahamiyatga ega bo‘ldi.

Olingan Xit-B adsorbenti vakuumli filtrlash usuli yordamida eritmadan ajratib olindi va deionizatsiyalangan suv bilan yuvilib, muhit pH qiymati neytral holatga keltirildi.

Shundan so‘ng, namlikni to‘liq yo‘qotish maqsadida material ikki bosqichli quritish jarayonidan o‘tkazildi: dastlab 298 K haroratda 12 soat davomida, keyin esa 373 K haroratda 2 soat davomida quritildi. Natijada rux ionlarini adsorbsiyalash uchun mo‘ljallangan barqaror, strukturaviy jihatdan mustahkam Xit-B biosorbenti olindi.

Muvozanat adsorbsiya jarayonlarini tavsiflashda asosan Lengmyur, Freyndlix va Temkin izoterma modellari qo‘llaniladi va adsorbsiya intensivligini baholashga xizmat qiladi [9].

Lengmyur izotermasining matematik ifodasi quyidagicha:

$$Q_e = \frac{Q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (1)$$

Freyndlix adsorbsiyalanish izotermasining matematik ifodasi quyidagicha yoziladi:

$$Q_e = K_f \cdot (C_e)^{1/n} \quad (2)$$

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

Temkin izotermasining matematik chiziqli tenglamasi quyidagicha chiziqli shaklga keltiriladi:

$$Q_e = \frac{RT}{b} \ln K_T + \frac{RT}{b} \ln C_e \quad (4)$$

Dubin–Radushkevich (D–R) izotermasi modeli

$$q_e = q_s e^{-K_{DR} \varepsilon^2} \quad (5)$$

ε –qiymati quyidagi tenglama bilan ifodalana-di:

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (6)$$

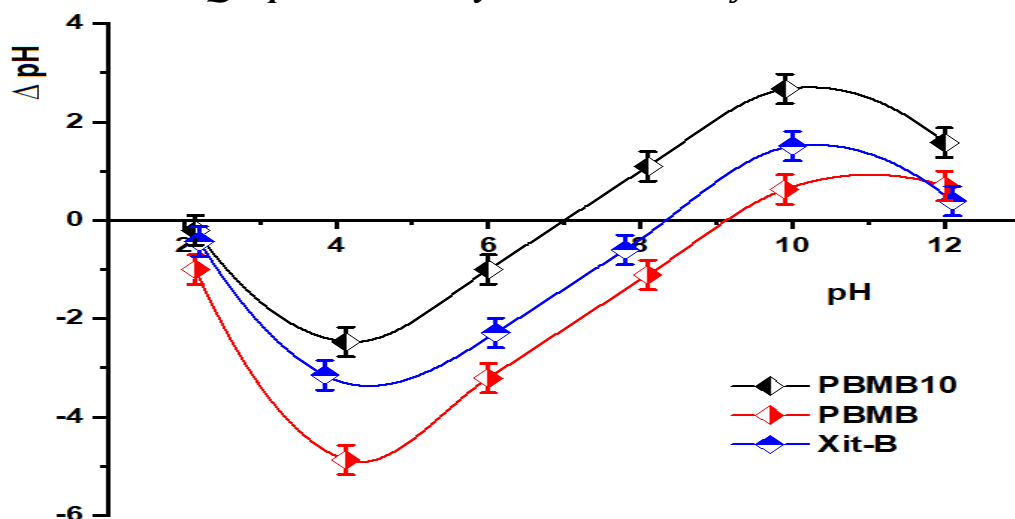
NATIJALAR VA MUXOKAMA. PBMB PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining pH_{pzc} hisoblash. Adsorbentlarning nol zaryad nuqtasini aniqlash aniqlash, ularning adsorbsiya jarayonlaridagi xatti-harakatlarini tushunishda muhim ahamiyatga ega. PBMB PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining pH_{pzc} hisoblash natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining pH_{pzc} bo‘yicha ko‘rsatkichlari

PBMB			PBMB10			Xit-PBMB		
bosh. pH	key. pH	ΔpH	bosh. pH	key. pH	Δ pH	bosh. pH	key. pH	Δ pH
2,1	3,2	-1,1	2,1	2,3	-0,2	2,2	2,6	-0,4
4,2	9	-4,8	4,1	6,6	-2,5	3,8	7	-3,2
6	9,2	-3,2	6	7	-1	6,1	8,4	-2,3
8,1	9,2	-1,1	8,1	7	1,1	7,8	8,4	-0,6
9,9	9,3	0,6	9,9	7,2	2,7	10	8,5	1,5
12	11,3	0,7	12	10,4	1,6	12,1	11,7	0,4

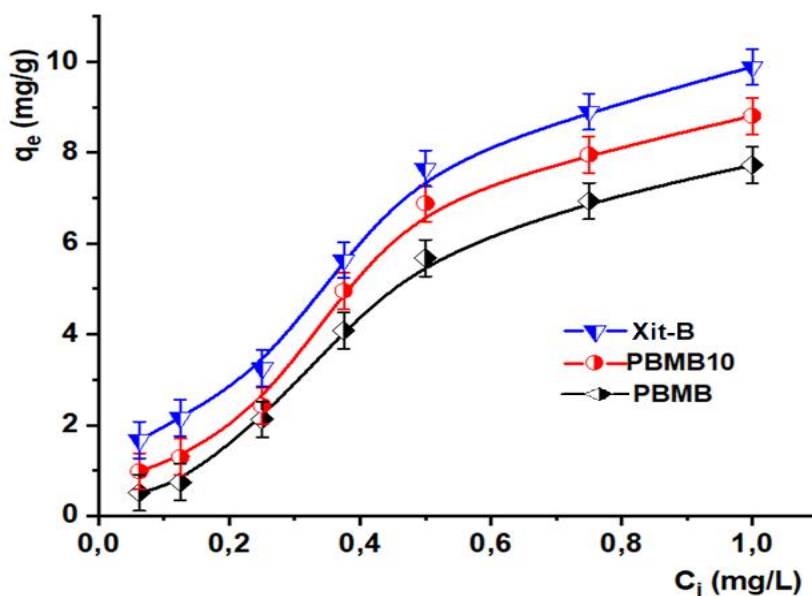
PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining pH_{pzc} grafigi 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining pH_{pzc} grafigi

PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining pH_{pzc} grafigini taxlil qiladigan bo‘lsak, adsorbentlarning nol zaryad nuqtasi bu boshlang‘ich va yakuniy pH qiymatlari teng bo‘lgan nuqta sifatida aniqlanadi, ya‘ni grafikda boshlang‘ich pH va yakuniy pH qiymatlarining chiziqlari kesishgan joyda hosil bo‘ladi. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlari uchun pH_{pzc} qiymatlari mos ravishda 8,43; 9,12 va 7,04 ga teng ekanligi aniqlandi.

PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining izotermalari grafiklari 2-rasmda keltirilgan.



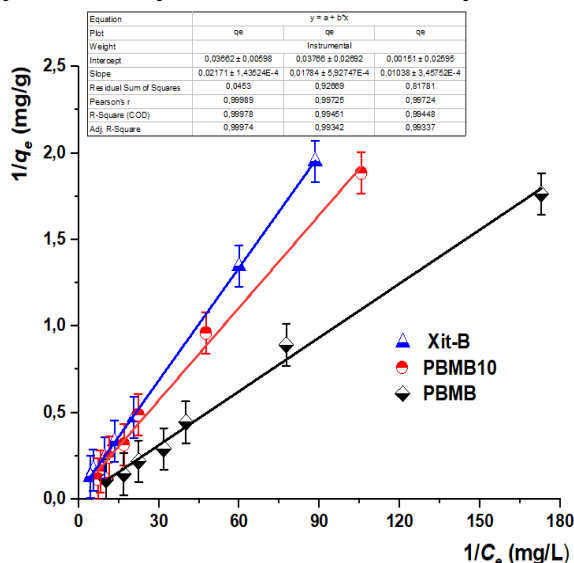
2-rasm. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining izotermalari grafiklari

Rasmdan ko‘rish mumkinki, past konsentratsiya sohasida (taxminan 0,1–0,3 mg/L) adsorbsiya nisbatan sekin kechadi. O‘rta konsentratsiya oralig‘ida (0,3–0,7 mg/L) esa q_e iymatining keskin oshishi kuzatiladi, bu adsorbent yuzasida ko‘plab faol markazlarning bo‘sh holatda bo‘lishi bilan bog‘liq. Yuqori konsentratsiya sohasida (0,7–1,0 mg/L) esa adsorbsiya jarayoni sekinlashib, to‘yinish holatiga yaqinlashadi. Bu esa adsorbent yuzasidagi faol markazlarning asta-sekin band bo‘lib borayotganini ko‘rsatadi.

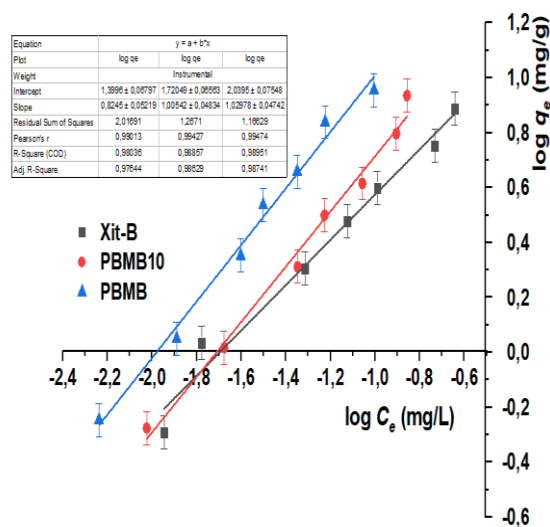
Adsorbentlar orasida eng yuqori adsorbsion sig'im Xit-B biosorbentida kuzatilib, uning maksimal q_e qiymati taxminan 10 mg/g ga yetadi. PBMB10 namunasi o'rtacha natija ko'rsatib, ~9 mg/g atrofida, PBMB esa eng past qiymat (~7,5–8 mg/g) bilan tavsiflanadi. Bu natija xitozan bilan modifikatsiya qilingan materiallarda funksional guruhlar ($-NH_2$ va $-OH$) sonining ortishi hamda kompleks hosil qilish qobiliyatining kuchayishi bilan izohlanadi.

Suvdagi rux (II) ionlarining biosorbentlarga adsorbsiya izotermalarini tahlil qilish uchun Lengmyur, Freyndlix, Temkin, Dubinin-Radushkevich (D-R) modellari foydalanildi.

Lengmyur va Freyndlix izotermalari bo'yicha adsorbsiya tahlili. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga suvdagi rux (II) ionlarining ionlari adsorbsiyasining Lengmyur va Freyndlix modellari bo'yicha natijalari 3 va 4-rasmlarda keltirilgan.



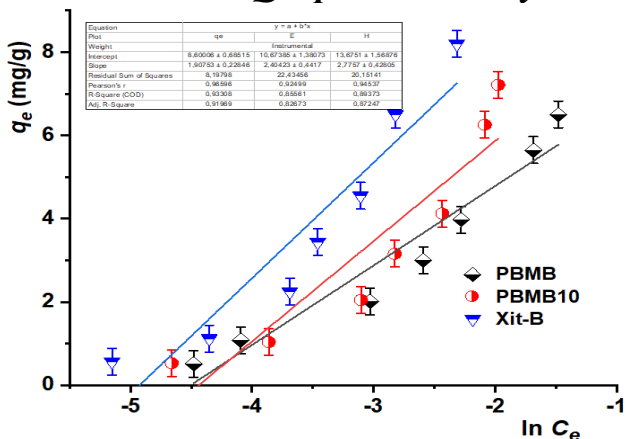
3-rasm. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga suvdagi Zn (II) ionlarining adsorbsiyalanishining Lengmyur modeli grafigi



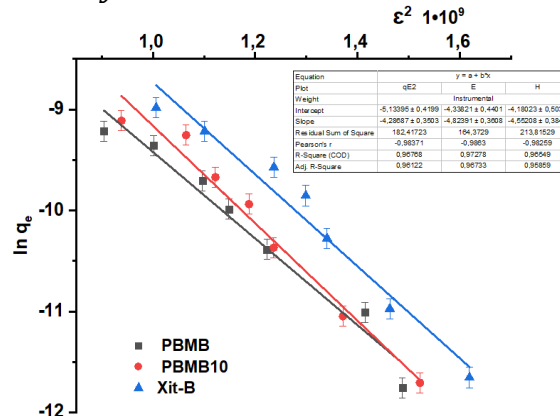
4-rasm. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga suvdagi Zn (II) ionlarining adsorbsiyalanishining Freyndlix modeli grafigi

PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga suvdagi rux (II) ionlarining ionlari adsorbsiyasining Lengmyur va Freyndlix modellari bo'yicha natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga suvdagi rux (II) ionlarining ionlari adsorbsiyasining Temkin va Dubinin-Radushkevich (D-R) modellari bo'yicha natijalari 5 va 6-rasmlarda keltirilgan.



5-rasm. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga Zn²⁺ ionlarining adsorbsiyalanishining Temkin modeli grafigi



6-rasm. PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga Zn²⁺ ionlarining adsorbsiyalanishining Dubinin –Radushkevich modeli grafigi

Temkin va Dubinin-Radushkevich (D-R) modellari grafiklari natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlariga suvdagi rux (II) ionlarining adsorbsiyasi Lengmyur, Freyndlix, Temkin va Dubinin-Radushkevich (D-R) modellari taxlil quyidagi jadvalda rkeltirilgan.

2-jadval

Suvdagi rux (II) ionlarining PBMB, PBMB10, Xit-B adsorbentlarga Lengmyur, Freyndlix, Temkin va Dubinin-Radushkevich modellari bo‘yicha ko‘rsatkichlari

Izoterma modellari	Ko‘rsatkichlar	PBMB, PBMB10, Xit-B adsorbentlari		
		PBMB	PBMB10	Xit-B
Lengmyur	q_{max} (mg/g)	26,307±0,018	27,553±0,017	66,225±1,021
	KL (L/mg)	1,686±0,012	2,111±0,015	1,454±0,021
	RL	0,011±0,014	0,009±0,015	0,013±0,002
	R^2	0,999	0,993	0,993
Freyndlix	KF (mg/g)	25,095±0,016	52,541±0,01	109,521±0.009
	$1/n$	0,824±0,021	1,005±0,003	1,029±0.017
	n	1,212±0,021	0,994±0,09	0,971±0.017
	R^2	0,991	0,991	0,991
Temkin	BT (kJ/mol)	4,559±0.013	4,499±0.015	5,012±0.017
	KT (L/mg)	95,495±0.016	95,495±0.019	150,316±0.022

	R^2	0.957	0.915	0.957
Dubinin-Radushkevich	q_m (mg/g)	$0,385 \pm 0.017$	$0,756 \pm 0.014$	$0,328 \pm 0.019$
	βd (mol ² /kJ ²)	$1,3069 \pm 0.02$	$0,921 \pm 0.01$	$1,036 \pm 0.08$
	E (kJ/mol)	$0,618 \pm 0.031$	$0,736 \pm 0.021$	$0,694 \pm 0.008$
	R^2	0.751	0.755	0.769

Jadvalni tahlil qildigan bo'lsak, o'tkazilgan tadqiqot natijalari Lengmyur, Freyndlix, Temkin va Dubinin–Radushkevich (D–R) izoterma modellari asosida PBMB, PBMB10 va Xit-B adsorbentlarining Zn^{2+} ionlariga nisbatan adsorbsion xususiyatlarini baholash imkonini berdi. Lengmyur modeli bo'yicha olingan natijalarga ko'ra, maksimal adsorbsiya sig'imi (q_{max}) PBMB uchun 26,307 mg/g, PBMB10 uchun 27,553 mg/g va Xit-B uchun 66,225 mg/g ni tashkil etdi. Ushbu ko'rsatkich Xit-B adsorbentining sezilarli darajada yuqori adsorbsion sig'imga ega ekanligini va uning sirtida Zn^{2+} ionlari uchun ko'proq faol markazlar mavjudligini ko'rsatadi. Modelning moslik darajasi juda yuqori bo'lib ($R^2 = 0,993–0,999$), bu jarayonning monomolekulyar qatlam hosil bo'lishiga yaqinligini ko'rsatadi. Freyndlix modeli natijalariga ko'ra $1/n$ qiymatlarining 0,824–1,029 oralig'ida bo'lishi adsorbsiya jarayonining asosan geterogen sirtlarda kechishini va ayrim holatlarda kooperativ adsorbsiya mexanizmi mavjudligini ko'rsatadi.

Umuman olganda, olingan natijalar Xit-B adsorbenti Zn^{2+} ionlarini yutish bo'yicha eng yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatadi. Adsorbsiya jarayoni asosan Lengmyur modeliga mos kelib, monomolekulyar, fizik tabiatli va energetik jihatdan qulay jarayon sifatida tavsiflanadi.

XULOSA. Ushbu tadqiqotda PBMB bentoniti hamda uning kislotali faollashtirilgan va xitozan bilan modifikatsiya qilingan (PBMB10 va Xit-B) shakllarining suvdagi Zn^{2+} ionlarini adsorbsiyalash xususiyatlari o'rganildi. Olingan natijalar biosorbentlarning sirt xususiyatlari va funksional guruhlar tarkibi ularning adsorbsion samaradorligiga bevosita ta'sir qilishini ko'rsatdi.

Izoterma modellari tahlili shuni ko'rsatdiki, adsorbsiya jarayoni asosan monoqatlamli va geterogen sirtli mexanizmlarga yaqin bo'lib, Freyndlix va Temkin modellari ham jarayonning murakkab energetik tabiatini tasdiqladi. Dubinin–Radushkevich modeli esa adsorbsiya fizik-kimyoviy tabiatga ega ekanligini ko'rsatdi.

Umuman olganda, bentonitni kislotali faollashtirish va xitozan bilan modifikatsiya qilish uning strukturaviy va kimyoviy xossalarini sezilarli yaxshilab, Zn^{2+} ionlarini suv muhitidan samarali tozalash imkonini beradi. Eng yuqori adsorbsion samaradorlik Xit-B biosorbentida kuzatildi, bu esa uni og'ir metall ionlarini tozalashda istiqbolli material sifatida qo'llash mumkinligini tasdiqlaydi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Uraz E, Hayri-Senel T, Erdol-Aydin Nalan, Nasun-Saygili G. Removal of zinc from wastewaters using Turkish bentonite and artificial neural network [ANN] modeling. Heliyon. 2024. e39080. doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39080

2. Kostin A, Mostalygina L V, Bukhtoyarov O I, The mechanism of adsorption of zinc and cadmium ions onto bentonite clay. *Prot Met Phys Chem Surf* 51, 773–778 (2015). <https://doi.org/10.1134/S2070205115050172>

3. Kaya A, Oren A H, Adsorption of zinc from aqueous solutions to bentonite. *J Hazard Mater.* 2005 Oct 17;125(1-3):183-9. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.05.027. PMID: 16005147.

4. Yekula P K , Vijetha P, Kumaraswamy K, Pallavi P, Rao K, Kumar A, Maria D K, Gaddam K. (2010). Adsorption of zinc by natural adsorbent Bentonite - A clay material. *International Journal of Applied Environmental Sciences.* 5. 581-589.

5. Pan G X, Zhang Y J, Chai D G, Yu Y F. Study on the Adsorption Performance of Zn(II) over Bentonite. *Key Engineering Materials* Volumes 575-576 . <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.575-576.276>

6. Wencui CH, Yanfang H, Shengpeng S, Guihong H, Jiongtian L, Yijun C adsorption behavior of zn(ii) onto natural minerals in wastewater. A comparative study of bentonite and kaolinite. ppmp170122 *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 53(1), 2017, 264–278 *Physicochemical Problems of Mineral Processing* www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/ ISSN 1643-1049 (print) ISSN 2084-4735 (online) Received April 4, 2016; reviewed; accepted June 27, 2016 <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp>

7. Nasser S, Yaquubov A, Alemi A. Adsorption of zinc and copper (II) ions from aqueous solution using modified nano bentonite: equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies. (2021) *Separation Science and Technology*, 56(16), 2708–2720. <https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1846055>

8. Lupa L, Visa A, Popa A, Dinu M V, Fringu I, Dragan E S. Adsorption of Zinc Ions from Aqueous Solutions on Polymeric Sorbents Based on Acrylonitrile-Divinylbenzene Networks Bearing Aminophosphonate Groups. *Molecules* 2025, 30, 4805. <https://doi.org/10.3390/molecules30244805>

9. Osman AI, Eman M, El-Monaem A, Elgarahy AM, Aniagor Ch.O, Hosny M, Farghali M, Rashad E, Ejimofor MI, Lopez-Maldonado EA, Ihara I, Yap PS, Rooney DW, Eltaweil AS. Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. *Environmental Chemistry Letters.* Vol. 21. 2023. P.2337–2398. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4>

10. Wang P, Shen X, Qiu S, Zhang L, Ma Y, Liang J. 2024. Clay-based materials for heavy metals adsorption: mechanisms, advancements, and future prospects in environmental remediation. *Crystals.* Vol. 14(12), 1046. <https://doi.org/10.3390/cryst14121046>