



UDK: 547.458:541.49:544.777

Ra'no QO'CHQOROVA,

Kimyo fanlari nomzodi, dotsent, O'zbekiston Milliy pedagogika universiteti, Toshkent, O'zbekiston

E-mail: ranokuckorova983gmail.com

Professor, k.f.d Z.Smanova taqrizi asosida

RESULTS OF THE STUDY OF THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF NARTIUM ALGINATE

Annotation

This article presents the results of studying the physicochemical properties of alginate: water solubility, viscosity, molecular weight, gel-forming properties, charged carboxylate groups, sensitivity to pH, ionic strength, and changes in properties under the influence of temperature.

Keywords: Physicochemical properties, water solubility, viscosity, molecular weight, polyelectrolyte nature, pH sensitivity and ability to form gels with metal ions, molecular weight, size-exclusion chromatography (SEC), gelling cations, Bidentate chelation, "zig-zag" G-blocks.

NARTIY ALGINATNING FIZIK-KIMYOVIY XOSSALRINI O'RGANILISH NATIJALARI

Annotatsiya

Ushbu maqolada alginatning fizik-kimyoviy xossalari: suvda eruvchanligi, qovushqoqligi, molekulyar massasi, gel hosil qilish xususiyati, zaryadlangan karboksilat guruhlarini, pH ga sezgirli, ion kuchi va harorat ta'sirida xossalarning o'zgarishi kabi xossalarni o'rganishdan olingan natijalari keltirilgan.

Kalit so'zlar. Fizik-kimyoviy xossalari, suvda eruvchanlik, yopishqoqlik, molekulyar massa, polielektrolit tabiat, pH-sezgirlik va metall ionlari bilan gel hosil qilish qobiliyati, molekulyar massasi, hajmiy-eksklyuzion xromatografiya (SEC), gellovchi kationlar, Bidentat xelatlanish, "zig-zag"simon G-bloklar.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЬГИНАТА НАРТИЯ

Аннотация

В данной статье представлены результаты исследования физико-химических свойств альгината: растворимости в воде, вязкости, молекулярной массы, гелеобразующих свойств, заряженных карбоксилатных групп, чувствительности к pH, ионной силе и изменениям свойств под воздействием температуры.

Ключевые слова: физико-химические свойства, растворимость в воде, вязкость, молекулярная масса, природа полиэлектролита, чувствительность к pH и способность образовывать гели с ионами металлов, молекулярная масса, эксклюзионная хроматография (SEC), гелеобразующие катионы, бидентатное хелатирование, «зигзагообразные» G-блоки.

Kirish. Olib borilgan tadqiqotlarimimiz natijasida natriy alginat jigarrang suv o'tlarining hujayra devorlaridan olinadigan tabiiy anionli chiziqli polisaxarid bo'lib, uning fizik-kimyoviy xossalari suvda eruvchanlik, yopishqoqlik, molekulyar massa, polielektrolit tabiat, pH-sezgirlik va metall ionlari bilan gel hosil qilish qobiliyati orqali namoyon bo'lishi aniqlandi [1, 2, 4, 8].

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. Natriy alginat suvda yaxshi eriydigan polielektrolit bo'lib, suv bilan gidratlanganda quyuq, yelimshak kolloid eritma hosil qiladi. Uning eruvchanligi ekstraksiya sharoitlari, ayniqsa ishqoriy muhit pH qiymati va ekstraksiya davomiyligiga bog'liq [8, 11, 13, 15, 16]. Eritma yopishqoqligi esa asosan molekulyar massa va polimer konsentratsiyasi bilan belgilanadi: molekulyar massa va konsentratsiya ortishi bilan eritmaning yopishqoqligi ham oshadi. Natriy alginat eritmalari pH qiymatiga sezgir bo'lib, pH 3,5 atrofida karboksilat guruhlarining qisman protonlanishi va vodorod bog'larining kuchayishi natijasida yopishqoqlik maksimal darajaga yaqinlashadi [1, 2, 14, 16-18].

Tadqiqot metodologiyasi. Hozirgi kunda sanoatda qo'llaniladigan natriy alginatlarning o'rtacha molekulyar massasi odatda 32–400 kDa oralig'ida bo'ladi [1, 18]; ayrim tadqiqotlarda esa Mw 168 kg/mol yoki 216 121 Da qiymatlari qayd etilgan [7, 18]. Biroq hajmiy-eksklyuzion xromatografiya (SEC) orqali molekulyar massa aniqlanganda pullulan yoki dekstran standartlaridan foydalanish alginat zanjirlarining nisbatan qattiq konformatsiyasi sababli haqiqiy molekulyar massani 4–6 barobar yuqori ko'rsatishi mumkin [1, 19-21].

Tahlil va natijalar. Natriy alginat makromolekulasining asosiy funksional markazlari karboksil ($-\text{COOH}$), karboksilat ($-\text{COO}^-$) va gidroksil ($-\text{OH}$) guruhlaridir [2, 5, 23, 24]. Neytral yoki ishqoriy muhitda karboksil guruhlarini deprotonlanib, manfiy zaryadlangan karboksilat guruhlariga aylanadi va polimeriga anionli polielektrolit xususiyat beradi. Aynan $-\text{COO}^-$ guruhlarini ko'p valentli metall kationlari bilan ion almashinish, koordinatsion bog'lanish va xelatlanish jarayonlarida asosiy bog'lanish markazlari sifatida qatnashadi [2, 13, 23-26].



1-rasm. Polielektrolit kompleks (PEC) va IPN (o'zaro kirishgan polimer tarmoq) tizimlarini tarkibidagi turli polionlarning mumkin bo'lgan ionli o'zaro ta'sirlari va ionli harakatlari

Natriy alginat Ca^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{3+} va Al^{3+} kabi ko'p valentli kationlar ishtirokida gidrogellar hosil qiladi [2, 9, 12]. Bu jarayon, ayniqsa, guluron kislotasi qoldiqlariga boy G-bloklar orasida metall kationlarining koordinatsion joylashuvi bilan bog'liq bo'lib, adabiyotlarda "tuxum qutisi" modeli - egg-box modeli orqali izohlanadi. Ushbu modelga ko'ra, metall kationlari qo'shni alginat zanjirlaridagi G-bloklar orasida joylashib, zanjirlarni ionli tiklanish, ya'ni cross-linking orqali uch o'lchamli tarmoqqa biriktiradi. Ikki valentli kationlarning alginatga bog'lanish yaqinligi odatda $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Co}^{2+}$, Ni^{2+} , $\text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+}$ tartibida ifodalanadi. Bu ketma-ketlik alginat asosidagi metall komplekslarining barqarorligi, gel mustahkamligi va funksional xossalari baholashda muhim mezon hisoblanadi [1, 3, 9, 12].

Natriy alginatning muhim fizik-kimyoviy xususiyatlaridan biri uning pH, ion kuchi va haroratga sezgirligidir. Alginat tarkibidagi M va G qoldiqlarining pKa qiymatlari mos ravishda taxminan 3,38 va 3,65 atrofida bo'lib, muhit pH qiymati ushbu chegaradan pastga tushganda karboksilat guruhlar protonlanadi va suvda erimaydigan algin kislotasi hosil bo'ladi [7, 10, 27]. pH < 3 sharoitda alginat eritmada barqaror qolmaydi, balki cho'kma yoki vodorod bog'lari bilan stabillashgan kislotali gidrogel hosil qilishi mumkin. G-bloklar odatda pH 3,5 da, M-bloklar esa pH 2 atrofida cho'kishga moyil bo'ladi [2, 9]. Eritmadagi ion kuchi ham alginat zanjirlarining konformatsiyasi, shishish darajasi va gel barqarorligiga ta'sir qiladi: NaCl konsentratsiyasi yuqori bo'lganda Na^+ ionlari Ca^{2+} kabi gellovchi kationlar bilan raqobatlashib, gelning shishishi yoki qisman parchalanishiga olib kelishi mumkin [2, 9, 14]. Harorat ortishi esa eritma yopishqoqligini kamaytiradi, kationlarning polimer tarmog'i bo'ylab diffuziyasini tezlashtiradi va yuqori haroratda zanjir depolimerizatsiyasini kuchaytirib, gelning mexanik mustahkamligini pasaytirishi mumkin. Qurug holatdagi kalsiy alginat taxminan 200°C dan boshlab dekarboksillanish jarayonlari hisobiga parchalanadi. Demak, natriy alginatning fizik-kimyoviy xossalari uning polielektrolit tabiati, molekulyar massasi, M/G nisbati, karboksilat guruhlarining ionlanish darajasi hamda muhit pH qiymati, ion kuchi va harorat kabi tashqi omillar bilan chambarchas bog'liq [1, 2, 28-30].

Alginatning metall ionlari bilan kompleks birlamchalari hosil qilish mexanizmlari va polimer-metall tarmoq hosil bo'lish qonuniyatleri. Natriy alginatning metall ionlari bilan kompleks hosil qilish qobiliyati uning makromolekulyar zanjirida joylashgan karboksilat ($-\text{COO}^-$), gidroksil ($-\text{OH}$) guruhlar, 1,4-glikozid bog'lari va halqa tarkibidagi efir kislorodlarining elektron-donor xossalari bilan belgilanadi [3]. Neytral yoki ishqoriy muhitda karboksil guruhlar deprotonlanib, manfiy zaryadlangan $-\text{COO}^-$ markazlarini hosil qiladi; aynan shu guruhlar metall kationlari bilan elektrostatik tortishish, koordinatsion bog'lanish va ion almashinish jarayonlarida asosiy faol markaz sifatida qatnashadi [2]. Karboksilat guruhidagi kislorod atomlari metall ionlari uchun kuchli donor markaz bo'lib, kompleksning birlamchi koordinatsion sferasini shakllantiradi [8]. $-\text{OH}$ guruhlar esa asosan vodorod bog'lari orqali makromolekulyar muhitni barqarorlashtiradi, ayrim hollarda esa metall ionining karboksilat va qo'shni gidroksil guruhlar bilan bir vaqtda koordinatsiyalanishiga yordam beradi [1, 7]. 1,4-glikozid bog'lari va efir kislorodlari to'g'ridan-to'g'ri asosiy bog'lanish markazi sifatida emas, balki zanjir konformatsiyasini belgilovchi va metall ionlari atrofida barqaror koordinatsion muhit hosil bo'lishiga ko'maklashuvchi strukturaviy omil sifatida ahamiyatga ega [4, 7, 13, 21].

Metall ionlarining natriy alginat bilan bog'lanishi bir necha koordinatsion rejimda amalga oshishi mumkin. Monodentat bog'lanishda metall kationi karboksilat guruhining faqat bitta kislorod atomi bilan koordinatsiyalanadi; bu holat ayrim Zn^{2+} komplekslari uchun xos deb ko'rsatiladi [1, 12]. Bidentat xelatlanishda esa metall ioni bitta $-\text{COO}^-$ guruhining ikkala kislorod atomi bilan bog'lanib, nisbatan barqaror xelat halqasini hosil qiladi. Bidentat ko'priqli bog'lanishda metall ioni ikki qo'shni alginat zanjiridagi karboksilat guruhlar orasida ko'priq vazifasini bajaradi va makromolekulalararo tiklanish, ya'ni cross-linking jarayonini yuzaga keltiradi [1,4]. Ushbu ko'priqli koordinatsiya alginatning gel hosil qilish qobiliyati uchun muhim bo'lib, ayniqsa guluron kislotasi segmentlarida joylashgan "zig-zag"simon G-bloklar metall kationlari uchun koordinatsion "kovaklar" yaratadi [2, 9]. Ikki valentli kationlar, jumladan Ca^{2+} , Ba^{2+} va Sr^{2+} , ushbu kovaklarga joylashib, qo'shni zanjirlardagi kislorod atomlari bilan koordinatsion-xelat bog'lar hosil qiladi; natijada adabiyotlarda "tuxum qutisi" modeli -egg-box modeli sifatida izohlanadigan uch o'lchamli gidrogel tarmog'i vujudga keladi [1,2].

Natriy alginatning metall ionlari bilan komplekslanishida ion almashinish mexanizmi ham asosiy jarayonlardan biridir. Eritmadagi ko'p valentli metall kationlari alginat zanjiridagi Na^+ ionlarini, gel holatidagi tizimlarda esa ayrim hollarda Ca^{2+} ionlarini siqib chiqarib, ularning o'rnini egallaydi. Bu jarayon metall ionining alginat funksional guruhlariga bo'lgan yaqinligi bilan belgilanadi: masalan, Pb^{2+} va Cu^{2+} kabi og'ir metall ionlari alginat bilan Ca^{2+} ga nisbatan kuchliroq bog'lanadi, shu sababli Ca^{2+} -alginat gellari bunday metall ionlarini ion almashinish orqali samarali yutishi mumkin. Umuman olganda, natriy alginatdagi $-\text{COO}^-$ va $-\text{OH}$ guruhlarining kislorod atomlari metall ionlari uchun asosiy donor markazlar bo'lib xizmat qiladi, G-bloklarning fazoviy joylashuvi esa ushbu ionlarni xelatlash, ko'priqli koordinatsiya orqali zanjirlarni bog'lash va barqaror makromolekulalararo komplekslar hosil qilish imkonini beradi [1, 4].

Xulosa va takliflar. Olib borilgan tadqiqot natijasida adabiyotlar tahlili alginat Na^+ , Ca^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} kabi metallarning ionlari bilasn o'zaro ta'sirlashganida kompleks hosil qilishi quyidagilarni ko'rsatadi:

- Na-alginat- Cu^{2+} va Na-alginat- Zn^{2+} komplekslarida eng muhim ilmiy bo'shliq komplekslanish mexanizmining molekulyar darajada yetarli aniqlanmaganligidir;

- Ikkinchi muhim bo'shliq optimal pH, metall nisbati, morfologiya va nazoratli ajralish o'rtasidagi bog'liqlikning yetarli tizimlashtirilmaganligidir.

- Ko'p tadqiqotlar pH 5 yoki pH 7,4 kabi statik sharoitlarda bajarilgan, biroq yara yuzasi, oshqozon-ichak muhiti yoki sanoat oqava suvlari kabi o'zgaruvchan pH tizimlarida Cu^{2+} va Zn^{2+} komplekslarining uzoq muddatli barqarorligi, metall ionlarining ajralish kinetikasi va gel tarmog'ining regeneratsiya qobiliyati kam o'rganilgan ;

- Shuningdek, metall nisbatining zaryad neytrallanishi, bog'lanmagan ionlar miqdori, swelling, mexanik mustahkamlik va biologik faollikka ta'siri bo'yicha aniq optimallashtirilgan parametrlar yetarli emas;

- Tabiiy polimer bo'lgan alginatda g'ovak o'lchami, granula shakli, xerogel yoki aerogel ichki tuzilishini boshqarish ham dolzarb muammo bo'lib qolmoqda. Bu yo'nalishda mikroflyuidika, 3D-printing, boshqariladigan quritish va bimetallik $\text{Cu}^{2+}/\text{Zn}^{2+}$ -alginat tizimlari yordamida aniq morfologiyaga, barqaror mexanik xossaga va oldindan belgilangan ajralish profiliga ega gidrogel yoki skaffoldlar yaratish istiqbolli hisoblanadi.

ADABIYOTLAR

1. Tordi P., Ridi F., Bonini M., Samori P. Cation-specific complexation modalities and hydrogel matrix properties. Advanced Functional Materials. 2025. Vol. 35. DOI: 10.1002/adfm.20241639026,27

2. Agrawal N., Siddiqui M. A., Gupta S., Jaiswal M., Lanjhiyana S. K. Exploring recent advances in colon-targeted drug delivery systems: from traditional methods to advanced technologies. *Journal of Materials Science: Polymers*. 2026. Vol. 1. P. 11. DOI: 10.1007/s44493-026-00011-832,33.
3. Zhao L., Wang J., Zhang P., Gu Q., Gao C. Absorption of Heavy Metal Ions by Alginate. *Bioactive Seaweeds for Food Applications*. 2018. P. 255-268. DOI: 10.1016/B978-0-12-813312-5.00013-328.
4. Fuks L., Filipiuk D., Majdan M. Transition metal complexes with alginate biosorbent. *Journal of Molecular Structure*. 2006. Vol. 792–793. P. 104–109. DOI: 10.1016/j.molstruc.2005.12.05329,30.
5. Elwakeel K. Z., Ahmed M. M., Akhdhar A., Sulaiman M. G. M., Khan Z. A. Recent advances in alginate-based adsorbents for heavy metal retention from water: a review. *Desalination and Water Treatment*. 2022. Vol. 272. P. 50–74. DOI: 10.5004/dwt.2022.2883436.
6. L. Agüero, D. Zaldivar-Silva, L. Peña, M.L. Dias, Alginate microparticles as oral colon drug delivery device: a review, *Carbohydr. Polym.*, 168 (2017) 32–43.
7. Alkhayer G., et al. Enantioselective Release Behavior of Ketoprofen Enantiomers from Alginate-metal beads. *Analytical and Bioanalytical Chemistry Research*. 2020. Vol. 7, No. 1. P. 61-763,4.
8. Alkhayer G. Alginate Metal Complexes and Their Application. *IntechOpen*. 2021. DOI: 10.5772/intechopen.988855,6.
9. Donati I., Christensen B. E. Alginate-metal cation interactions: Macromolecular approach. *Carbohydrate Polymers*. 2023. Vol. 321. P. 121280. DOI: 10.1016/j.carbpol.2023.12128010.
10. Ghate M. M., Poluri K. M. In-vitro evaluation of alginate as an encapsulation matrix for pH-dependent delivery of bacteriophage T4L and T7L endolysins. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 323. P. 147135. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.14713513,14.
11. Yamashita C., Moraes I. C. F., Haminiuk C. W. I., Ferreira A. G., Branco C. C. Z., Nunes N. S. S., Negreiros A. T., Mayer C. R. M., Branco I. G. Extraction and modification of brown algae-derived sodium alginate by ozonation: Characterization and behavior at different pH levels. *Algal Research*. 2025. Vol. 90. P. 104277. DOI: 10.1016/j.algal.2025.10427711,12.
12. Wang Y., Shen Z., Wang H., Song Z., Yu D., Li G., Liu X., Liu W. Progress in Research on Metal Ion Crosslinking Alginate-Based Gels. *Gels*. 2025. Vol. 11. P. 16. DOI: 10.3390/gels110100167,8.
13. Al-Fakeh M. S., Al-Subaie N. S., EL-Ghoul Y., Hamden Z. Preparation and properties of a novel alginate/carrageenan crosslinked coordination polymer and evaluation of the antibacterial, antioxidant and anticancer potential of Co(II) and Cr(III) polymeric complexes. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 38934. DOI: 10.1039/d4ra06818a34,35
14. Bertagnolli C., Grishin A., Vincent T., Guibal E. Recovering Heavy Metal Ions from Complex Solutions Using Polyethylenimine Derivatives Encapsulated in Alginate Matrix. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2016. Vol. 55. P. 2461-2470. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b0468331.
15. S. Mao, T. Zhang, W. Sun, X. Ren, The depolymerization of sodium alginate by oxidative degradation, *Pharm. Dev. Technol.* 17 (6) (2012) 763 – 769, <https://doi.org/10.3109/10837450.2011.583927>
16. S. Sugiono, M. Masruri, T. Estiasih, S.B. Widjanarko, Multiple-response optimization of the acidic pre-treatment of the brown alga *Sargassum cristaeifolium* for the alginate extraction using twin screw extruder, *Biosci. Res.* 15 (2) (2018) 683 – 693.
17. I.P.S. Fernando, W. Lee, E.J. Han, G. Ahn, Alginate-based nanomaterials: fabrication techniques, properties, and applications, *Chem. Eng. J.* 391 (2020) 123823, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123823b>
18. Y. Zhao, W. Shen, Z. Chen, T. Wu, Freeze-thaw induced gelation of alginates, *Carbohydr. Polym.* 148 (2016) 45 – 51, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.047>
19. J. Yang, S. Chen, Y. Fang, Viscosity study of interactions between sodium alginate and CTAB in dilute solutions at different pH values, *Carbohydr. Polym.* 75 (2) (2009) 333 – 337, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.07.037>
20. Christensen, B. E., Skjåk-Bræk, G., & Smidsrød, O. (2007). Comment on “ conformational changes and aggregation of alginic acid as determined by fluorescence correlation spectroscopy ” . *Biomacromolecules*, 8(10), 3279. <https://doi.org/10.1021/bm078004k>
21. Yang, J., & Sato, T. (2020). Conformation of pullulan in aqueous solution studied by small-angle X-ray scattering. *Polymers*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/polym12061266>
22. Wu Z. L., Shen C. Y., Huang C. P., Shih Y. J. Catalytic phase transition of cobalt oxide enriched in mesoporous carbon polyhedrons for electrosorption of molybdate oxyanions. *Journal of Hazardous Materials*. 2026. Vol. 502. P. 140623. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.14062317,18.
23. Garland, N., Gordon, R., Hopkins, I., Ward, E., McElroy, C.R., MacQuarrie, D., Parkin, I. 2025. Polysaccharide-derived sulfur-containing mesoporous carbon materials for platinum group metal recovery. *Carbon* 239, 120309. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120309>
24. Lanjhiyana SK, Bajpayee P, Kesavan K, Lanjhiyana S, Muthu MS (2013) Chitosan–sodium alginate blended polyelectrolyte complexes as potential multiparticulate carrier system: colon-targeted delivery and gamma scintigraphic imaging. *Expert Opin Drug Deliv* 10:5–15. <https://doi.org/10.1517/17425247.2013.734805>
25. Wang, Z., Yun, S., Wang, X., Wang, C., Si, Y., Zhang, Y., Xu, H., 2019. Aloe peel- derived honeycomb-like bio-based carbon with controllable morphology and its superior electrochemical properties for new energy devices. *Ceram Intern* 45, 4208 – 4218. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.091>
26. J.-J. Chuang, Y.-Y. Huang, S.-H. Lo, T.-F. Hsu, W.-Y. Huang, S.-L. Huang, Y.-S. Lin, Effects of pH on the shape of alginate particles and its release behavior, *Int. J. Pol. Sci.* 2017 (2017) 3902704.
27. D. Ji, J. M. Park, M. S. Oh, T. L. Nguyen, H. Shin, J. S. Kim, D. Kim, H. S. Park, J. Kim, Superstrong, superstiff, and conductive alginate hydrogels. *Nat. Commun.* 2022, 13, 3019. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30691-z>
28. P. dos Santos Araújo, G. B. Belini, G. P. Mambrini, F. M. Yamaji, W. R. Waldman, Thermal degradation of calcium and sodium alginate: A greener synthesis towards calcium oxide micro/nanoparticles *Int. J. Biol. Macromol.* 2019, 140, 749. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.103>
29. N. Patel, D. Lalwani, S. Gollmer, E. Injeti, Y. Sari, J. Nesamony, Development and evaluation of a calcium alginate based oral ceftriaxone sodium formulation. *Prog. Biomater.* 2016, 5, 117. <https://doi.org/10.1007/s40204-016-0051-9>
30. Agarwal M., Ganesan R., Dutta J. R. Functional nanomaterials in combating antimicrobial resistance: Innovations in wound dressings and biomedical implants. *Nano Trends*. 2026. Vol. 13. P. 100174. DOI: 10.1016/j.nwnano.2025.1001741,2.