Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 5, Issue 2, 2026 Chemistry of Goods

ANOR (PUNICA GRANATUM L.) PO‘STLOG‘I ASOSIDA BIOLIGANDLAR OLISH VA ULAR ISHTIROKIDA CU VA ZN KOMPLEKSLI MIKROO‘G‘ITLAR SINTEZI.

Ibrohimjon Rahmonovich Asqarov
Andijon davlat universiteti Kimyo kafedrasi professori, kimyo fanlari doktori, O‘zbekistonda xizmat ko‘rsatgan ixtirochi, O‘zbekiston TABOBAT Akademiyasi raisi
https://orcid.org/0000-0003-1625-0330

Jasurbek Mahmudjon o‘g‘li Jalolov
Farg‘ona davlat texnika universiteti, Kimyo muhandisligi kafedrasi doktoranti.
https://orcid.org/0009-0009-2926-2219

Farhod Sultonahmadovich Abdugapparov
Andijon davlat universiteti Kimyo kafedrasi dotsenti, kimyo fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
https://orcid.org/0000-0002-4213-8396
E-mail: farhodabdugaffarov@mail.ru

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss2.2026.643

Kalit so'zlar: anor po‘stlog‘i, bioligand, Cu-bioxelat, mikroo‘g‘it, IQ-spektroskopik tahlil, polifenollar, koordinatsion kompleks, ekologik o‘g‘it

Annotatsiya

Ushbu maqolada anor (Punica granatum L.) po‘stlog‘i asosida bioligandlar olish va ular ishtirokida Cu-bioxelat sintez qilish jarayoni o‘rganildi. IQ-spektroskopik tahlil natijalari fenil va karboksil guruhlarning Cu^{2+} ionlari bilan koordinatsion bog‘ hosil qilganini tasdiqladi. Yangi Cu–O bog‘larining paydo bo‘lishi kompleks hosil bo‘lishini ko‘rsatdi. Olingan biokompleks ekologik xavfsiz mikroo‘g‘it sifatida baholandi.

Havola uchun:

Jalolov, J., Asqarov, I., & Abdugapparov, F. ANOR (PUNICA GRANATUM L.) PO‘STLOG‘I ASOSIDA BIOLIGANDLAR OLISH VA ULAR ISHTIROKIDA Cu VA Zn KOMPLEKSLI MIKROO‘G‘ITLAR SINTEZI. Tovarlar Kimyosi Va Xalq Tabobati Jurnali, 5(2). https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss2.2026.643

Kirish. Ma’lumki, qishloq xo‘jaligida o‘simliklarning yuqori hosildor bo‘lishi va mahsulot sifatini oshirishda ularni mikroelementlar bilan oziqlantirish muhim ahamiyatga ega. O‘simliklarni o‘sishi va tashqi muhit hamda turli kasalliklarga chidamliligini oshirishda ham mikroelementlarning o‘rni beqiyos. Mis (Cu) va rux (Zn) elementlari ham o‘simlik fiziologiyasida muhim rol o‘ynaydi, chunki ular o‘simliklarda fermentativ jarayonlarda, fotosintez, oksidlanish-qaytarilish reaksiyalari, oqsil va nuklein kislotalar sintezi hamda antioksidant himoya tizimini ta’minlashda ishtirok etadi [1].

Jumladan, Zn mikroelement sifatida 300 dan ortiq fermentlarning kofaktori hisoblanib, DNK sintezi va ko‘plab gormonlar almashinuvida ishtirok etadi. Ushbu elementning yetishmovchiligi o‘simlik barglarda xloroz kasalligini kelib chiqishi va o‘sishning sekinlashishiga sabab bo‘ladi [3].

O‘simlik tarkibidagi Cu esa plastotsianin va oksidoreduktaza fermentlari tarkibiga kiradi. Plastotsianin fotosintezda elektron tashishni ta’minlab, energiya hosil bo‘lishida ishtirok etadi. Oksidoreduktaza fermentlari esa redoks jarayonlarni boshqarib, metabolizm va antioksidant himoyani ta’minlaydi. Bu esa o‘simlikni tashqi muhitga chidamlilikni oshiradi, biroq misning ortiqcha miqdori o‘simlik uchun toksik ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Shu sababli ushbu mikroelementlarning faqat miqdori emas, balki ularning qanday kimyoviy shaklda qo‘llanilishi ham muhim ahamiyat kasb etadi.

Bugungi kunda qishloq xo‘jaligi amaliyotida Cu va Zn asosan sulfat tuzlari ($CuSO_4$ va $ZnSO_4$) ko‘rinishida qo‘llaniladi. Bunday hollarda bu birikmalarni ishqoriy va karbonatli tuproqlarda kam eruvchan holatga o‘tishi ularni o‘simlik tomonidan o‘zlashtirilishini qiyinlashtiradi [4]. Bundan tashqari, bu tuzlarni o‘simliklarga yuqori konsentratsiyada berilishi fitotoksik ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Shu sababli so‘nggi yillarda dunyoning ko‘plab mintaqalarida o‘simliklar tomonidan oson o‘zlashtiriladigan va kam toksik bo‘lgan organik va xelatlangan mikroo‘g‘itlarga qiziqish ortib bormoqda.

Masalan, Zn-aminokislota xelatlari $ZnSO_4$ ga nisbatan bug‘doyda don sifati va mineral tarkibini yaxshilashda yuqori samaradorlikka ega ekanligi aniqlangan [5]. Shuningdek, organik xelatlar esa karbonatli tuproqlarda oddiy tuzlarga nisbatan yuqori natija berishi qayd etilgan [6].

Shu nuqtai nazardan, ko‘plab tadqiqotchilar tomonidan yangi turdagi bioligandlar asosidagi mikroo‘g‘itlar olishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Bioligandlar tabiiy organik moddalar bo‘lib, metall ionlari bilan koordinatsion komplekslar hosil qilish xususiyatini namoyon etadi. Bunday birikmalar qatoriga aminokislotalar, organik kislotalar, gumin moddalar, flavonoidlar va tanninlar kabi biologik faol birikmalar kiradi [7,8].

Bioligandlar tarkibiga kiritilgan metall ionlarini barqaror holda saqlaydi, ularni o‘simlik organizmiga oson kirishini ta’minlaydi va toksik ta’sirini kamaytiradi.

Mualliflar tomonidan olib borilgan tadqiqotlarida bioxelatlar hozirda qo‘llanilib kelinayotgan sintetik xelatlarga ekologik jihatdan maqbul bo‘lgan alternativ vositasifatida yuqori baholangan [9].

Shu bois tabiiy xom ashyolardan bioligandlar olish va ular asosida mikroo‘g‘itlar ishlab chiqish istiqbolli yo‘nalish hisoblanadi.

Bunday tabiiy manbalar orasida anor po‘stlog‘i (*Punica granatum L.*) alohida ahamiyatga ega. Anor po‘stlog‘i meva massasining katta qismini tashkil etishi bilan bir qatorda oziq-ovqat sanoatida chiqindi sifatida tashlab yuboriladi. Lekin, anor po‘stlog‘i biologik faol moddalarga boy manba hisoblanadi.

Olib borilgan ilmiy tadqiqotlarda anor po‘stlog‘i tarkibida punikalagin, ellagen kislotasi, gall kislotasi va turli flavonoidlar mavjudligi aniqlangan [10,11].

Ushbu birikmalar tarkibida ko‘p sonli gidroksil (-OH) va karboksil (-COOH) guruhlari bo‘lib, ular metall ionlari bilan koordinatsion birikmalar hosil qiladi. Shu jihatdan anor po‘stlog‘i bioligand sifatida qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan arzon va bioparchalanuvchan xom ashyo hisoblanadi.

Anor po‘stlog‘idan polifenollar ajratib olishda qo‘llaniladigan texnologiyalar ularning bioligand sifatidagi samaradorligiga bevosita o‘z ta’sirini ko‘rsatadi. ekstraksiya (suv-etanolli), ultratovush yordamidagi ekstraksiya va fermentatsiya usullarida polifenollar olish samarali ekanligi tajribalarda aniqlangan [12,13].

Ekstraksiya sharoiti o‘zgarishi natijasida fenol birikmalar tarkibi va miqdori ham o‘zgaradi, bu esa keyingi kompleks hosil qilish jarayoniga ta’sirini o‘tkazadi. Shu sababli bioligandlarning kimyoviy tarkibini nazorat qilish asosiy vazifalardan hisoblanadi.

Polifenollar metall ionlari bilan kompleks hosil qilish xususiyatiga ega bo‘lib, bu jarayon fenol guruhlarning dissotsiatsiyalanishi va metall ionlari bilan koordinatsiyalanishi orqali amalga oshadi.

Mualliflar tomonidan polifenollar metallarni o‘ziga biriktirish xususiyatiga ega ekanini ta’kidlab o‘tilgan [14].

Shuningdek, tadqiqotchilar karboksil va gidroksil guruhlar metall bog‘lanishida asosiy rol o‘ynashi ta’kidlangan [15].

Aniqlanishicha Cu ning organik moddalar bilan mustahkam kompleks hosil qila oladi. Bu tajribalarda o‘z isbotini topgan [16].

Bu ma’lumotlar anor po‘stlog‘i tarkibidagi polifenollar Cu^{2+} va Zn^{2+} ionlari bilan barqaror komplekslar hosil qilishi mumkinligini nazariy jihatdan asoslaydi.

Anor po‘stlog‘ining metalllar bilan o‘zaro ta’siri bir qator tajribaviy ishlar bilan tasdiqlangan [17,18,19,20].

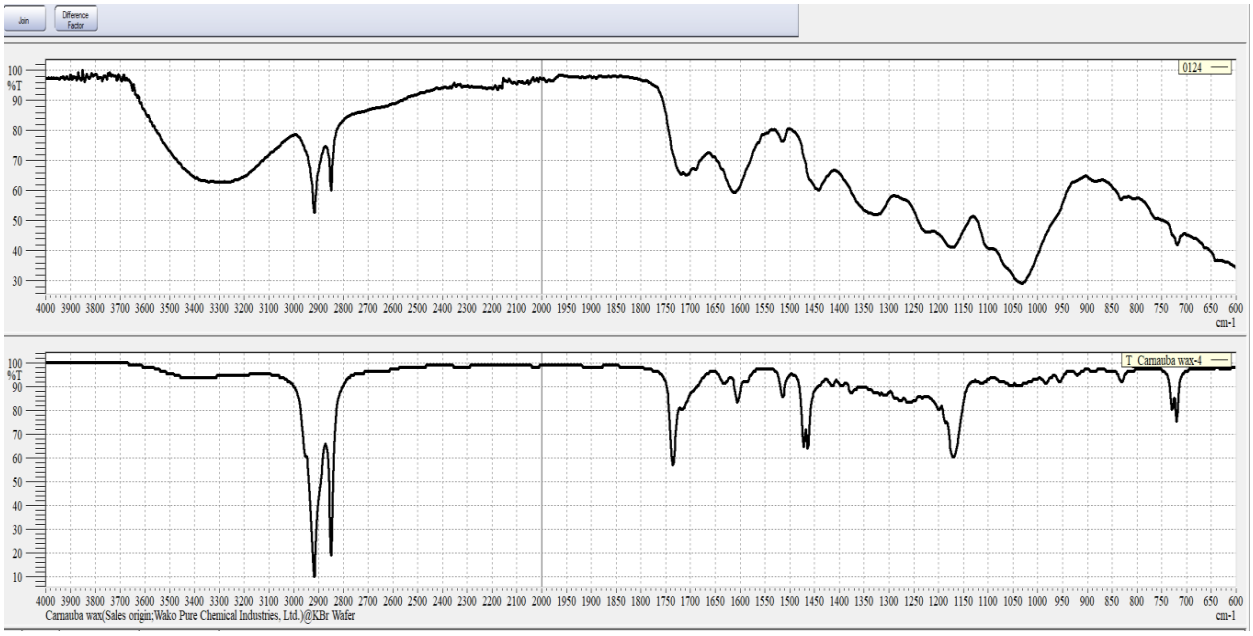
Ushbu tadqiqotlar anor po‘stlog‘i ekstrakti metalllar bilan kimyoviy o‘zaro ta’sirlashib, barqaror komplekslar hosil qilish xususiyatiga ega ekanini isbotlaydi.

Organik birikmalar asosidagi xelat tuzilishli mikroo‘g‘itlar bo‘yicha olib borilagn ko‘plab tadqiqotlar ularning agrobiologik samaradorligini tasdiqlaydi. Jumladan, Zn-aminokislota xelatlari bug‘doyda yuqori samara berganini ko‘rsatgan. Cu asosidagi organik o‘g‘itlar ham fotosintez va mahsuldorlikka ijobiy ta’sir ko‘rsatgan. Bu esa Cu va Zn ionlarini organik matritsaga kiritish ularning samaradorligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etadi [21] .

Anor po‘stlog‘i asosidagi bioligandlar qo‘shimcha afzallikka ega, chunki ular kompleks hosil qilishdan tashqari antioksidant xususiyatga ham ega. Bu esa anor po‘stlog‘i asosidagi Cu va Zn komplekslari o‘simliklarda tashqi muhitga bo‘lgan himoyani ham kuchaytirishi mumkinligini bildiradi [22,23].

Shu bilan birga, adabiyotlar tahlili muhim ilmiy bo‘shliq mavjudligini ko‘rsatadi. Anor po‘stlog‘i polifenollari va ularning metalllar bilan o‘zaro ta’siri yaxshi o‘rganilgan bo‘lsa-da, ular asosida Cu va Zn kompleksli mikroo‘g‘itlar yaratish va ularning agrobiologik samaradorligini baholash bo‘yicha tadqiqotlar uchramaydi. Bu esa mazkur yo‘nalishning ilmiy yangiligini belgilaydi.

Tadqiqot natijalari. Infraqizil spektroskopiya (IQ) usuli anor po‘stlog‘i ekstrakti asosida sintez qilingan Cu-bioxelatning tuzilishini va kompleks hosil bo‘lish jarayonida ishtirok etuvchi funksional guruhlarni aniqlash maqsadida qo‘llanildi. Bu jarayonda bioligand (anor po‘stlog‘i ekstrakti) va hosil qilingan Cu-kompleks spektrlari taqqoslab tahlil qilindi (1-rasm).



1-rasm. Bioligand va Cu-kompleks IQ-spektrlari

Anor po‘stlog‘i ekstrakti spektrida 3200–3600 sm^{-1} diapazonida keng va intensiv yutilish sohalari kuzatildi, bu fenol va gidroksil (–OH) guruhlarga xosdir. Cu^{2+} ionlari bilan kompleks hosil bo‘lgandan so‘ng mazkur sohalar intensivligining kamayishi va past chastotalar tomon siljishi qayd etildi. Bu holat gidroksil guruhlarning deprotonlashishi va metall ionlari bilan koordinatsion bog‘lar hosil qilganini ko‘rsatadi.

2920–2850 sm^{-1} sohadagi C–H valent tebranishlariga tegishli yutilishlar har ikki spektrda ham kuzatildi va ularda sezilarli o‘zgarishkuzatilmadi. Bu bioligandning alifatik qismi kompleks hosil bo‘lish jarayonida deyarli o‘zgarmasdan qolganini anglatadi.

1700–1600 sm^{-1} diapazonidagi yutilish polosalari karbonil (C=O) va aromatik halqalarning tebranishlariga tegishli bo‘lib, bioligand spektrida aniq namoyon bo‘ldi. Kompleks hosil bo‘lgandan keyin

ushbu polosaning past chastotalar tomon siljishi va yutilish intensivligining o‘zgarishi kuzatildi. Bu karboksil va aromatik guruhlarning Cu^{2+} ionlari bilan koordinatsion bog‘lar hosil qilganini bildiradi.

1600–1400 sm^{-1} sohadagi yutilishlarda ham sezilarli o‘zgarishlar qayd etildi. Bu diapazon odatda karboksilat (COO^-) guruhlarning asimmetrik va simmetrik tebranishlariga tegishli bo‘lib, yutilish sohalarining o‘zgarishi –COOH guruhlarning metall bilan bog‘lanib, COO^- holatiga o‘tganini tasdiqlaydi.

1300–1000 sm^{-1} diapazonida C–O va C–O–C guruhlariga tegishli polosalarda ham intensivlik o‘zgarishi kuzatildi. Bu fenol va efir guruhlar ham kompleks hosil bo‘lish jarayonida ishtirok etganini ko‘rsatadi.

Eng muhim natija sifatida, Cu-bioxelat spektrida 600–400 sm^{-1} diapazonida yangi yutilish sohalari paydo bo‘ldi. Ushbu yutilishlar Cu–O bog‘lariga xos bo‘lib, metall va bioligand o‘rtasida koordinatsion bog‘lar hosil bo‘lganining bevosita isboti hisoblanadi.

Shunday qilib, IQ spektroskopik tahlil natijalari anor po‘stlog‘i ekstrakti tarkibidagi fenol va karboksil guruhlar Cu^{2+} ionlari bilan barqaror biokompleks hosil qilganini ko‘rsatadi. Spektral yutilishlar siljishi va yangi Cu–O bog‘lariga tegishli signallarning paydo bo‘lishi kompleks hosil bo‘lish jarayonini to‘liq tasdiqlaydi.

Tajriba qism.

Foydalanigan reaktiv va jihozlar.

Reaktivlar: NaOH 1% li, H_2O_2 3% li, anor po‘stlog‘i, distillangan suv.

Jihozlar: Laboratoriya quritish shkafiga (Model: ShS 80-01 SPU), laboratoriya tegirmoni (Model: KIKA M20 WERKE), magnitli aralashtirgich (Model:MS-7-X-550-PRO).

Anor po‘stlog‘ini tayyorlash.

Tadqiqotlarda bioligand manbai sifatida anor (Punica granatum L.) po‘stlog‘i ishlatildi. Xom ashyo mahalliy bozordan olinib, avvalo distillangan suv bilan bir necha marta yuvildi va tashqi qo‘shimchalardan tozalandi. Yuvilgan po‘stloqlar laboratoriya quritish shkafiga (Model: ShS 80-01 SPU) joylashtirilib, 60–70 °C haroratda 6–8 soat davomida quritildi.

Quritilgan material laboratoriya tegirmonida (Model: KIKA M20 WERKE) maydalandi va 0,5–1 mm o‘lchamli zarracha fraksiyasigacha maydalanib, keyingi tadqiqotlar uchun havo kirmaydigan idishlarda saqlandi.

Bioligandni ishqoriy ekstraksiya qilish.

Anor po‘stlog‘i tarkibidagi polifenol birikmalarni faollashtirish maqsadida ishqoriy ekstraksiya usuli qo‘llanildi. Buning uchun maydalangan biomassa 1 % li NaOH eritmasi bilan 1:10 (massasi/hajm) nisbatda aralashtirildi.

Olingan aralashma magnitli aralashtirgichda (Model:MS-7-X-550-PRO) 55–60 °C haroratda 2 soat davomida 300 rpm tezlikda aralashtirildi. Ushbu jarayonda anor po‘stlog‘i tarkibidagi fenol, flavonoid va boshqa funksional guruhlarga ega organik birikmalarning faolligi oshirildi.

Ekstraksiya jarayoni tugagandan keyin aralashma filtrlandi va filtrda qolgan qattiq biomassa distillangan suv bilan bir necha marta yuvilib, ortiqcha ishqor qoldiqlaridan tozalandi.

Biomassani oksidlovchi asosida faollashtirish.

Funksional guruhlarning reaksion qobiliyatini oshirish maqsadida biomassa vodorod peroksid (H_2O_2) bilan ishlovdan o‘tkazildi. Buning uchun filtrda qolgan biomassa 3 % li H_2O_2 eritmasi bilan 1:10 nisbatda aralashtirildi.

Aralashma magnitli aralashtirgichda 50–55 °C haroratda 1 soat davomida 300 rpm tezlikda aralashtirildi. Ushbu oksidlovchi ishlov natijasida biomassa tarkibidagi fenol va karboksil funksional guruhlar faollashib, metall ionlari bilan kompleks hosil qilish qobiliyati oshirildi.

Jarayon tugagandan keyin aralashma filtrlandi va qattiq faza distillangan suv bilan bir necha marta yuvildi. Keyin material 60 °C haroratda 4–5 soat davomida quritildi. Natijada metall ionlari bilan koordinatsion bog‘ hosil qilish qobiliyatiga ega bo‘lgan bioligand olindi.

Cu-bioxelat sintezi.

Cu asosidagi bioxelat sintezi olingan bioligandni mis sulfat eritmasi bilan o‘zaro ta’sirlashtirish orqali amalga oshirildi. Buning uchun bioligand 1 % li $CuSO_4$ eritmasi bilan 1:20 nisbatda aralashtirildi.

Olingan aralashma magnitli aralashtirgichda 50–60 °C haroratda 1–1,5 soat davomida 300 rpm tezlikda aralashtirildi. Bu jarayonda bioligand tarkibidagi gidroksil (–OH) va karboksil (–COOH) funksional guruhlar Cu^{2+} ionlari bilan koordinatsion komplekslar hosil qildi.

Reaksiya tugagandan keyin aralashma filtrlandi va qattiq faza Cu-bioxelat sifatida ajratildi. Olingan mahsulot distillangan suv bilan yuvilib, 60 °C haroratda quritildi. Mahsulot unumi 43% ni tashkil qildi.

Infraqizil spektroskopik tahlil.

Olingan bioligand va Cu-bioxelatning tuzilishini tahlil qilish uchun infraqizil spektroskopiya (FT-IR) usuli qo‘llanildi. Spektrlar 4000–400 sm^{-1} diapazonida yozib olindi. Spektral tahlil natijasida funksional guruhlar (–OH, –COOH va C–O) ishtirokida metall bilan koordinatsion bog‘lar hosil bo‘lgani hamda Cu–O bog‘larining shakllangani aniqlandi.

Xulosa. Ushbu tadqiqot natijalari anor (*Punica granatum* L.) po‘stlog‘i tarkibidagi polifenol birikmalar Cu^{2+} ionlari bilan koordinatsion bog‘lanish orqali barqaror bioxelat hosil qilish qobiliyatiga ega ekanini ko‘rsatdi. IQ-spektroskopik tahlil orqali gidroksil va karboksil guruhlarning kompleks hosil bo‘lish jarayonida faol ishtirok etgani hamda Cu–O bog‘larining shakllangani aniqlandi. Olingan biokompleks yuqori bioo‘zlashuvchi, past toksik va ekologik xavfsiz xususiyatlariga ega bo‘lib, zamonaviy agrokimyoda samarali mikroo‘g‘it sifatida qo‘llash uchun istiqbolli hisoblanadi.

Adabiyotlar

1. Ahmed, N.; Zhang, L.; Li, J. Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. Scientia Horticulturae, 2024, 318, 112600.
2. Neocleous, D.; Koukounaras, A.; Siomos, A. Impact of chelated or inorganic zinc applications in hydroponics. Agronomy, 2020, 10(6), 881.
3. Kumar, V.; Pandita, S.; Sidhu, G.P.S. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants. Chemosphere, 2021, 262, 127810.
4. Rahman, N.; Arshad, M.; Afzal, M. Bioavailability, speciation, and crop responses to copper, zinc, and boron fertilization. Agronomy, 2022, 12(8), 1837.
5. Ghasemi, S.; Khoshgoftarmanesh, A.H.; Afyuni, M. Effectiveness of zinc-amino acid chelates in wheat. European Journal of Agronomy, 2013, 45, 68–74.
6. Souri, M.K. Beneficial effects of foliar application of organic chelate fertilizers. Advances in Horticultural Science, 2018, 32, 321–330.
7. López-Rayo, S.; Hernández, D.; Lucena, J.J. EDDS ligand as a soil solubilizer of Fe, Mn, Zn and Cu. Environmental Research, 2023, 216, 114613.
8. Yin, F.; Li, J.; Wang, Y. Biodegradable chelating agents for enhancing phytoremediation. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 281, 116113.
9. Leporino, M.; De Mastro, F.; Santamaria, P. Biochelates as eco-friendly alternatives to synthetic chelates. Scientia Horticulturae, 2025, 330, 112901.
10. Mo, Y.; Zhao, Y.; Wang, L. Pomegranate peel as a source of bioactive compounds. Frontiers in Nutrition, 2022, 9, 887113.
11. Singh, J.; Kaur, H.P.; Verma, A. Pomegranate peel phytochemistry and applications. ACS Omega, 2023, 8, 35452–35469.
12. Huang, Z.; Foo, S.C.; Choo, W.S. Extraction of polyphenols from pomegranate peel. Food & Function, 2025, 16, 210–225.
13. Buenrostro-Figueroa, J.J.; et al. Extraction of polyphenols from pomegranate peel by fermentation. Fermentation, 2023, 9(6), 530.
14. Schmidt, M.A.; Martinez, C.E. Metal mobilization by natural polyphenols. Chemosphere, 2013, 93, 2255–2262.

15. Pan, J.; Li, X.; Zhang, Y. Adsorption mechanism of copper and zinc by biosorbents. Science of the Total Environment, 2022, 805, 150312.
16. Steinberg, S.M.; et al. Copper complexation by dissolved organic matter. Environments, 2018, 5(11), 125.
17. Ben-Ali, S.; Jaouali, I.; Ouederni, A. Adsorption of copper using pomegranate peel. Journal of Cleaner Production, 2017, 142, 3893–3900.
18. El-Ashtoukhy, E.S.Z.; Amin, N.K.; Abdelwahab, O. Removal of copper ions using pomegranate peel. Desalination, 2008, 223, 162–173.
19. Mohammadi, A.; et al. Green synthesis of ZnO nanoparticles using pomegranate peel. Scientific Reports, 2025, 15, 20853.
20. Bouricha, M.; et al. Green synthesis of CuO nanoparticles using pomegranate peel extract. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 152, 110598.
21. Ma, J.; et al. Copper and iron foliar fertilizers in grape cultivation. Scientia Horticulturae, 2019, 246, 440–447.
22. Saparbekova, A.A.; et al. Phenolic compounds from pomegranate peel. Molecules, 2022, 27, 9827.
23. Shabir, I.; et al. Bioactive potential of punicalagin. Food Research International, 2024, 180, 113785.

Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 5, Issue 2, 2026 Chemistry of Goods

ПОЛУЧЕНИЕ БИОЛИГАНДОВ НА ОСНОВЕ КОЖУРЫ ГРАНАТА (PUNICA GRANATUM L.) И СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНЫХ МИКРОУДОБРЕНИЙ CU ZN С ИХ УЧАСТИЕМ.

Иброҳимжон Раҳмонович Асқаров
Профессор кафедры химии Андижанского государственного университета, доктор химических наук, заслуженный изобретатель Узбекистана, председатель Академии медицины Узбекистана.
https://orcid.org/0000-0003-1625-0330

Жасурбек Махмуджон угли Жалолов
Аспирант кафедры химической инженерии Ферганского государственного технического университета.
https://orcid.org/0009-0009-2926-2219

Фарход Султонахмадович Абдугаппаров
Доцент кафедры химии Андижанского государственного университета, доктор философии (PhD) в области химии.
https://orcid.org/0000-0002-4213-8396
E-mail: farhodabdugaffarov@mail.ru

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss2.2026.643

Ключевые слова: Кожура граната, биолиганд, Cu-биохелат, микроудобрение, ИК-спектроскопический анализ, полифенолы, координационный комплекс, экологическое удобрение.

Аннотация

В данной статье исследован процесс получения биолигандов на основе кожуры граната (Punica granatum L.) и синтеза Cu-биохелата с их участием. Результаты инфракрасного (ИК) спектроскопического анализа подтвердили образование координационных связей между фенольными и карбоксильными группами и ионами Cu^{2+}. Появление новых связей Cu–O свидетельствует о формировании комплексного соединения. Полученный биокомплекс был оценён как экологически безопасное микроудобрение.

Как цитировать:

Жалолов, Ж., Асқаров, И., & Абдугаппаров, Ф. ПОЛУЧЕНИЕ БИОЛИГАНДОВ НА ОСНОВЕ КОЖУРЫ ГРАНАТА (PUNICA GRANATUM L.) И СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНЫХ МИКРОУДОБРЕНИЙ Cu Zn С ИХ УЧАСТИЕМ. Журнал химии товаров и народной медицины, 5(2). https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss2.2026.643

Введение. Известно, что в сельском хозяйстве обеспечение растений микроэлементами играет важную роль в повышении урожайности и улучшении качества продукции. Микроэлементы также имеют большое значение для усиления роста растений и повышения их устойчивости к неблагоприятным условиям окружающей среды и различным заболеваниям. Медь (Cu) и цинк (Zn) играют важную роль в физиологии растений, поскольку участвуют в ферментативных процессах, фотосинтезе, окислительно-восстановительных реакциях, синтезе белков и нуклеиновых кислот, а также в обеспечении антиоксидантной защиты растений [1].

В частности, цинк (Zn) как микроэлемент является кофактором более чем 300 ферментов и участвует в синтезе ДНК, а также в метаболизме многих гормонов. Дефицит данного элемента приводит к развитию хлороза листьев растений и замедлению их роста [3].

Медь (Cu), содержащаяся в растениях, входит в состав пластоцианина и ферментов оксидоредуктаз. Пластоцианин обеспечивает перенос электронов в процессе фотосинтеза и

участвует в образовании энергии. Оксидоредуктазные ферменты регулируют окислительно-восстановительные процессы, обеспечивая нормальный метаболизм и антиоксидантную защиту растений. Это способствует повышению устойчивости растений к неблагоприятным условиям окружающей среды. Однако избыточное содержание меди может оказывать токсическое воздействие на растения. Поэтому важное значение имеет не только количество этих микроэлементов, но и их химическая форма, в которой они применяются.

В настоящее время в сельскохозяйственной практике медь (Cu) и цинк (Zn) в основном применяются в форме сульфатных солей ($CuSO_4$ и $ZnSO_4$). Однако в щелочных и карбонатных почвах эти соединения могут переходить в малорастворимые формы, что значительно снижает их доступность для усвоения растениями [4]. Кроме того, применение этих солей в высоких концентрациях может вызывать фитотоксическое воздействие на растения. В связи с этим в последние годы во многих регионах мира возрастает интерес к органическим и хелатированным микроудобрениям, которые легче усваиваются растениями и обладают меньшей токсичностью.

Например, установлено, что хелаты цинка с аминокислотами (Zn–аминокислотные хелаты) обладают более высокой эффективностью по сравнению с $ZnSO_4$ в улучшении качества зерна и минерального состава пшеницы [5]. Кроме того, отмечено, что органические хелаты в карбонатных почвах показывают более высокую эффективность по сравнению с обычными солями [6].

С этой точки зрения, многими исследователями уделяется особое внимание разработке новых видов микроудобрений на основе биолигандов. Биолиганды представляют собой природные органические вещества, способные образовывать координационные комплексы с ионами металлов. К таким соединениям относятся биологически активные вещества, такие как аминокислоты, органические кислоты, гуминовые вещества, флавоноиды и танины [7,8].

Биолиганды обеспечивают стабильное удержание ионов металлов в своей структуре, способствуют их более эффективному поступлению в растительный организм и снижают их потенциальное токсическое воздействие.

В исследованиях, проведённых различными авторами, биохелаты были высоко оценены как экологически более предпочтительная альтернатива синтетическим хелатам, широко применяемым в современной сельскохозяйственной практике [9].

В связи с этим получение биолигандов из природного сырья и разработка на их основе микроудобрений рассматриваются как перспективное направление исследований.

Среди подобных природных источников особый интерес представляет кожура граната (Punica granatum L.). Кожура граната составляет значительную часть массы плода и, как правило, выбрасывается как отход пищевой промышленности. Однако она является богатым источником биологически активных веществ.

Научные исследования показали, что кожура граната содержит пуникалагин, эллаговую кислоту, галловую кислоту и различные флавоноиды [10,11].

Данные соединения содержат многочисленные гидроксильные (–OH) и карбоксильные (–COOH) функциональные группы, способные образовывать координационные соединения с ионами металлов. В связи с этим кожура граната может рассматриваться как недорогое и биоразлагаемое сырьё, пригодное для использования в качестве биолиганда.

Технологии, применяемые для извлечения полифенолов из кожуры граната, оказывают непосредственное влияние на их эффективность в качестве биолигандов. Экспериментальные исследования показали, что полифенолы эффективно извлекаются с использованием таких методов, как гидроалкогольная (водно-этанольная) экстракция, ультразвуковая экстракция и методы ферментации [12,13].

Изменение условий экстракции приводит к изменению состава и содержания фенольных соединений, что, в свою очередь, оказывает влияние на последующий процесс комплексообразования. В связи с этим контроль химического состава биолигандов является одной из основных задач.

Полифенолы обладают способностью образовывать комплексы с ионами металлов, и данный процесс осуществляется за счёт диссоциации фенольных групп с последующей их координацией с ионами металлов.

Рядом авторов отмечено, что полифенолы обладают выраженной способностью связывать ионы металлов [14].

Кроме того, исследователи отмечают, что карбоксильные и гидроксильные группы играют ключевую роль в связывании металлов [15].

Установлено, что медь (Cu) способна образовывать устойчивые комплексы с органическими соединениями, что подтверждено экспериментальными исследованиями [16].

Данные результаты теоретически обосновывают возможность образования устойчивых комплексов полифенолов, содержащихся в кожуре граната, с ионами Cu^{2+} и Zn^{2+}..

Взаимодействие кожуры граната с ионами металлов подтверждено рядом экспериментальных исследовани [17,18,19,20].

Данные исследования показывают, что экстракт кожуры граната способен вступать в химическое взаимодействие с ионами металлов и образовывать устойчивые комплексы.

Многочисленные исследования, посвящённые микроудобрениям хелатной структуры на основе органических соединений, подтверждают их высокую агробиологическую эффективность. В частности, показано, что Zn–аминокислотные хелаты демонстрируют высокую эффективность при выращивании пшеницы. Органические удобрения на основе Cu также оказывают положительное влияние на фотосинтез и продуктивность растений. Это свидетельствует о том, что включение ионов Cu и Zn в органическую матрицу играет важную роль в повышении их эффективности [21].

Биолиганды, полученные на основе кожуры граната, обладают дополнительным преимуществом, поскольку помимо способности к комплексообразованию они также проявляют антиоксидантные свойства. Это свидетельствует о том, что комплексы Cu и Zn на основе кожуры граната могут способствовать усилению защиты растений от неблагоприятных факторов окружающей среды [22,23].

В то же время анализ научной литературы показывает наличие значительного научного пробела. Несмотря на то, что полифенолы кожуры граната и их взаимодействие с ионами металлов достаточно хорошо изучены, исследования, посвящённые созданию комплексных микроудобрений Cu и Zn на их основе и оценке их агробиологической эффективности, практически отсутствуют. Это определяет научную новизну данного направления исследований.

Результаты исследования.

Метод инфракрасной (ИК) спектроскопии был применён для определения структуры Cu-биохелата, синтезированного на основе экстракта кожуры граната, а также для выявления функциональных групп, участвующих в процессе комплексообразования. При этом был проведён сравнительный анализ спектров биолиганда (экстракта кожуры граната) и полученного Cu-комплекса.

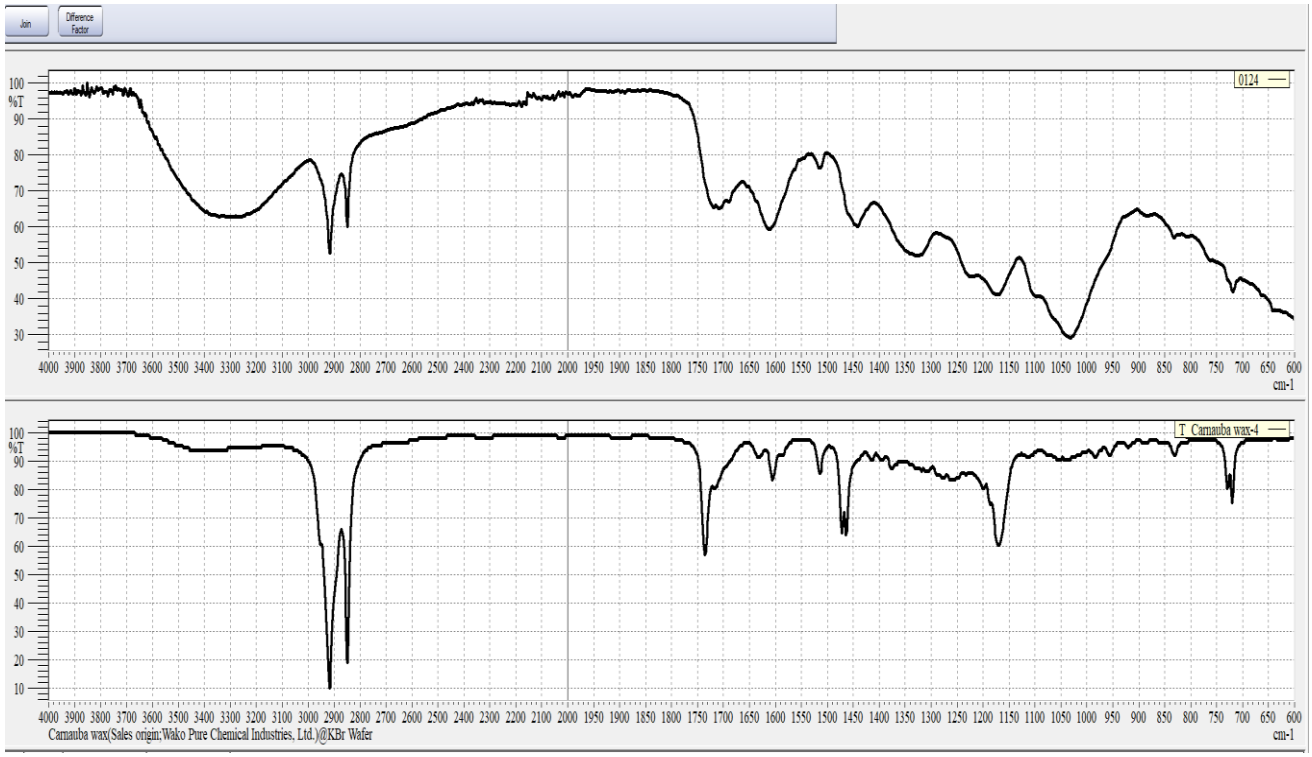


Рисунок 1. ИК-спектры биолиганда и Cu-комплекса.

В спектре экстракта кожуры граната наблюдаются широкие и интенсивные полосы поглощения в области 3200–3600 $см^{-1}$, характерные для фенольных и гидроксильных (–OH) групп. После образования комплекса с ионами Cu^{2+} отмечается уменьшение интенсивности этих полос и их смещение в сторону более низких частот. Это свидетельствует о депротонировании гидроксильных групп и образовании координационных связей с ионами металла.

Полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям C–H в области 2920–2850 $см^{-1}$, наблюдаются в обоих спектрах, при этом существенных изменений в данной области не выявлено. Это указывает на то, что алифатическая часть биолиганда практически не изменяется в процессе комплексообразования.

Полосы поглощения в области 1700–1600 $см^{-1}$ относятся к колебаниям карбонильных (C=O) групп и ароматических колец, которые чётко проявляются в спектре биолиганда. После образования комплекса наблюдается смещение данной полосы в область более низких частот и изменение интенсивности поглощения. Это свидетельствует о том, что карбоксильные и ароматические группы участвуют в образовании координационных связей с ионами Cu^{2+}.

Значительные изменения также зафиксированы в области 1600–1400 $см^{-1}$. Данный диапазон обычно соответствует асимметричным и симметричным валентным колебаниям карбоксилатных (COO^-) групп. Изменения в этих полосах поглощения подтверждают, что группы –COOH взаимодействуют с ионами металлов и переходят в форму COO^- в процессе комплексообразования.

Изменения интенсивности полос поглощения, соответствующих группам C–O и C–O–C, также наблюдались в области 1300–1000 $см^{-1}$. Это указывает на то, что фенольные и эфирные группы также участвуют в процессе комплексообразования.

Наиболее важным результатом является появление новых полос поглощения в области 600–400 $см^{-1}$ в спектре Cu-биохелата. Эти полосы характерны для связей Cu–O и являются прямым доказательством образования координационных связей между металлом и биолигандом.

Таким образом, результаты ИК-спектроскопического анализа показывают, что фенольные и карбоксильные группы, содержащиеся в экстракте кожуры граната, образуют устойчивый

биокомплекс с ионами Cu^{2+}. Смещение спектральных полос поглощения и появление новых сигналов, соответствующих связям Cu–O, полностью подтверждают процесс комплексообразования.

Экспериментальная часть

Использованные реактивы и оборудование.

Реактивы: 1%-ный раствор NaOH, 3%-ный раствор H_2O_2, кожура граната, дистиллированная вода.

Оборудование: лабораторный сушильный шкаф (модель: ShS 80-01 SPU), лабораторная мельница (модель: KIKA M20 WERKE), магнитная мешалка (модель: MC-7-X-550-PRO).

Подготовка кожуры граната.

В данном исследовании в качестве источника биолиганда использовалась кожура граната (Punica granatum L.). Сырьё было приобретено на местном рынке, тщательно промыто несколько раз дистиллированной водой и очищено от посторонних примесей. Промытая кожура была помещена в лабораторный сушильный шкаф (модель: ShS 80-01 SPU) и высушена при температуре 60–70 °C в течение 6–8 часов.

Высушенный материал измельчали в лабораторной мельнице (модель: KIKA M20 WERKE) до получения частиц размером 0,5–1 мм, после чего он хранился в герметичных ёмкостях для последующих исследований.

Щелочная экстракция биолиганда.

Для активации полифенольных соединений, содержащихся в кожуре граната, был применён метод щелочной экстракции. Для этого измельчённую биомассу смешивали с 1%-ным раствором NaOH в соотношении 1:10 (масса/объём).

Полученную смесь перемешивали на магнитной мешалке (модель: MC-7-X-550-PRO) при температуре 55–60 °C в течение 2 часов со скоростью перемешивания 300 об/мин. В ходе данного процесса повышалась активность органических соединений, содержащих фенольные, флавоноидные и другие функциональные группы, присутствующие в кожуре граната.

После завершения процесса экстракции смесь фильтровали, а твёрдую биомассу, оставшуюся на фильтре, несколько раз промывали дистиллированной водой для удаления остаточных щёлочных примесей.

Активация биомассы с использованием окислителя.

Для повышения реакционной способности функциональных групп биомасса была обработана перекисью водорода (H_2O_2). Для этого биомассу, оставшуюся на фильтре, смешивали с 3%-ным раствором H_2O_2 в соотношении 1:10. Полученную смесь перемешивали на магнитной мешалке при температуре 50–55 °C в течение 1 часа со скоростью 300 об/мин. В результате данного окислительного воздействия фенольные и карбоксильные функциональные группы, содержащиеся в биомассе, активировались, что повысило их способность образовывать комплексы с ионами металлов.

После завершения процесса смесь фильтровали, а твёрдую фазу несколько раз промывали дистиллированной водой. Затем материал высушивали при температуре 60 °C в течение 4–5 часов. В результате был получен биолиганд, способный образовывать координационные связи с ионами металлов.

Синтез Cu-биохелата.

Синтез биохелата на основе меди осуществляли путём взаимодействия полученного биолиганда с раствором сульфата меди. Для этого биолиганд смешивали с 1%-ным раствором $CuSO_4$ в соотношении 1:20.

Полученную смесь перемешивали на магнитной мешалке при температуре 50–60 °C в течение 1–1,5 часа со скоростью 300 об/мин. В ходе данного процесса гидроксильные

(–OH) и карбоксильные (–COOH) функциональные группы, содержащиеся в биолиганде, образовывали координационные комплексы с ионами Cu^{2+}. После завершения реакции смесь фильтровали, а твёрдую фазу выделяли в виде Cu-биохелата. Полученный продукт промывали дистиллированной водой и высушивали при температуре 60 °C. Выход продукта составил 43 %.

Инфракрасный спектроскопический анализ.

Для анализа структуры полученного биолиганда и Cu-биохелата был применён метод инфракрасной спектроскопии (FT-IR). Спектры регистрировали в диапазоне 4000–400 $см^{-1}$. В результате спектрального анализа было установлено, что в образовании координационных связей с металлом участвуют функциональные группы –OH, –COOH и C–O, а также подтверждено формирование связей Cu–O.

Заключение. Результаты данного исследования показали, что полифенольные соединения, содержащиеся в кожуре граната (Punica granatum L.), способны образовывать устойчивые биохелаты с ионами Cu^{2+} посредством координационного связывания. ИК-спектроскопический анализ подтвердил активное участие гидроксильных и карбоксильных функциональных групп в процессе комплексообразования, а также установил формирование связей Cu–O. Полученный биокомплекс характеризуется высокой биодоступностью, низкой токсичностью и экологической безопасностью, что делает его перспективным для применения в качестве эффективного микроудобрения в современной агрохимии.

Литературы

1. Ahmed, N.; Zhang, L.; Li, J. Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. Scientia Horticulturae, 2024, 318, 112600.
2. Neocleous, D.; Koukounaras, A.; Siomos, A. Impact of chelated or inorganic zinc applications in hydroponics. Agronomy, 2020, 10(6), 881.
3. Kumar, V.; Pandita, S.; Sidhu, G.P.S. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants. Chemosphere, 2021, 262, 127810.
4. Rahman, N.; Arshad, M.; Afzal, M. Bioavailability, speciation, and crop responses to copper, zinc, and boron fertilization. Agronomy, 2022, 12(8), 1837.
5. Ghasemi, S.; Khoshgoftarmanesh, A.H.; Afyuni, M. Effectiveness of zinc-amino acid chelates in wheat. European Journal of Agronomy, 2013, 45, 68–74.
6. Souri, M.K. Beneficial effects of foliar application of organic chelate fertilizers. Advances in Horticultural Science, 2018, 32, 321–330.
7. López-Rayo, S.; Hernández, D.; Lucena, J.J. EDDS ligand as a soil solubilizer of Fe, Mn, Zn and Cu. Environmental Research, 2023, 216, 114613.
8. Yin, F.; Li, J.; Wang, Y. Biodegradable chelating agents for enhancing phytoremediation. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 281, 116113.
9. Leporino, M.; De Mastro, F.; Santamaria, P. Biochelates as eco-friendly alternatives to synthetic chelates. Scientia Horticulturae, 2025, 330, 112901.
10. Mo, Y.; Zhao, Y.; Wang, L. Pomegranate peel as a source of bioactive compounds. Frontiers in Nutrition, 2022, 9, 887113.
11. Singh, J.; Kaur, H.P.; Verma, A. Pomegranate peel phytochemistry and applications. ACS Omega, 2023, 8, 35452–35469.
12. Huang, Z.; Foo, S.C.; Choo, W.S. Extraction of polyphenols from pomegranate peel. Food & Function, 2025, 16, 210–225.
13. Buenrostro-Figueroa, J.J.; et al. Extraction of polyphenols from pomegranate peel by fermentation. Fermentation, 2023, 9(6), 530.
14. Schmidt, M.A.; Martinez, C.E. Metal mobilization by natural polyphenols. Chemosphere, 2013, 93, 2255–2262.
15. Pan, J.; Li, X.; Zhang, Y. Adsorption mechanism of copper and zinc by biosorbents. Science of the Total Environment, 2022, 805, 150312.

16. Steinberg, S.M.; et al. Copper complexation by dissolved organic matter. Environments, 2018, 5(11), 125.
17. Ben-Ali, S.; Jaouali, I.; Ouederni, A. Adsorption of copper using pomegranate peel. Journal of Cleaner Production, 2017, 142, 3893–3900.
18. El-Ashtoukhy, E.S.Z.; Amin, N.K.; Abdelwahab, O. Removal of copper ions using pomegranate peel. Desalination, 2008, 223, 162–173.
19. Mohammadi, A.; et al. Green synthesis of ZnO nanoparticles using pomegranate peel. Scientific Reports, 2025, 15, 20853.
20. Bouricha, M.; et al. Green synthesis of CuO nanoparticles using pomegranate peel extract. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 152, 110598.
21. Ma, J.; et al. Copper and iron foliar fertilizers in grape cultivation. Scientia Horticulturae, 2019, 246, 440–447.
22. Saparbekova, A.A.; et al. Phenolic compounds from pomegranate peel. Molecules, 2022, 27, 9827.
23. Shabir, I.; et al. Bioactive potential of punicalagin. Food Research International, 2024, 180, 113785.

Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 5, Issue 2, 2026 Chemistry of Goods

PREPARATION OF BIO-LIGANDS FROM POMEGRANATE (PUNICA GRANATUM L.) PEEL AND THEIR APPLICATION IN THE SYNTHESIS OF CU AND ZN COMPLEX MICRONUTRIENT FERTILIZERS

Ibrohimjon R. Asqarov
Andijan State University Professor of the Department of Chemistry, Doctor of Chemistry, Honored Inventor of Uzbekistan, Chairman of the TABOBAT Academy of Uzbekistan
https://orcid.org/0000-0003-1625-0330

Jasurbek M. Jalolov
Fergana State Technical University, Doctoral student in the Department of Chemical Engineering.
https://orcid.org/0009-0009-2926-2219

Farhod S. Abdugapparov
Andijan State University Associate Professor of Chemistry, Doctor of Philosophy in Chemistry (PhD)
https://orcid.org/0000-0002-4213-8396
E-mail: farhodabdugaffarov@mail.ru

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss2.2026.643

Keywords: pomegranate peel, bio-ligand, Cu-biochelate, micronutrient fertilizer, FTIR spectroscopic analysis, polyphenols, coordination complex, eco-friendly fertilizer.

Annotation

In this study, the preparation of bio-ligands from pomegranate (Punica granatum L.) peel and the synthesis of a Cu-based biochelate in their presence were investigated. The results of FTIR spectroscopic analysis confirmed that phenolic and carboxyl functional groups formed coordination bonds with Cu^{2+} ions. The appearance of new Cu–O bonds indicated the formation of a coordination complex. The obtained biocomplex was evaluated as an environmentally safe micronutrient fertilizer.

How to Cite:

Jalolov, J., Asqarov, I., & Abdugapparov, F. PREPARATION OF BIO-LIGANDS FROM POMEGRANATE (PUNICA GRANATUM L.) PEEL AND THEIR APPLICATION IN THE SYNTHESIS OF Cu AND Zn COMPLEX MICRONUTRIENT FERTILIZERS. Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine, 5(2). https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss2.2026.643

Introduction. It is well known that the supply of micronutrients plays a crucial role in achieving high crop productivity and improving product quality in agriculture. Micronutrients are also essential for enhancing plant growth and increasing resistance to adverse environmental conditions and various plant diseases. Among these elements, copper (Cu) and zinc (Zn) play an important role in plant physiology, as they participate in enzymatic processes, photosynthesis, oxidation–reduction reactions, the synthesis of proteins and nucleic acids, and the maintenance of the antioxidant defense system in plants [1].

In particular, zinc (Zn), as a micronutrient, serves as a cofactor for more than 300 enzymes and is involved in DNA synthesis as well as in the metabolism of various plant hormones. Deficiency of this element leads to chlorosis in plant leaves and results in reduced growth rates [3].

Copper (Cu) present in plant tissues is a structural component of plastocyanin and oxidoreductase enzymes. Plastocyanin plays a key role in photosynthesis by facilitating electron transport and thereby contributing to energy production. Oxidoreductase enzymes regulate redox processes, ensuring proper metabolic activity and antioxidant defense in plants. This enhances plant tolerance to environmental stresses. However, excessive amounts of copper may exert toxic effects on plants. Therefore, not only the quantity of these micronutrients but also the chemical form in which they are applied is of great importance.

Currently, in agricultural practice, copper (Cu) and zinc (Zn) are mainly applied in the form of sulfate salts ($CuSO_4$ and $ZnSO_4$). However, under alkaline and carbonate soil conditions, these compounds tend to convert into poorly soluble forms, which significantly reduces their availability for plant uptake [4]. In addition, the application of these salts at high concentrations may cause phytotoxic effects on plants. Therefore, in recent years, there has been increasing interest worldwide in organic and chelated micronutrient fertilizers that are more easily absorbed by plants and exhibit lower toxicity.

For example, it has been established that Zn–amino acid chelates exhibit higher efficiency than $ZnSO_4$ in improving grain quality and mineral composition in wheat [5]. Furthermore, organic chelates have been reported to demonstrate superior performance in carbonate soils compared with conventional mineral salts [6].

From this perspective, considerable attention has been devoted by many researchers to the development of new types of micronutrient fertilizers based on bio-ligands. Bio-ligands are natural organic substances capable of forming coordination complexes with metal ions. Such compounds include biologically active substances such as amino acids, organic acids, humic substances, flavonoids, and tannins [7,8].

Bio-ligands stabilize incorporated metal ions, facilitate their efficient uptake by plants, and reduce their potential toxic effects.

In studies conducted by various authors, biochelates have been highly evaluated as an environmentally favorable alternative to the synthetic chelates currently used in agricultural practice [9].

Therefore, the extraction of bio-ligands from natural raw materials and the development of micronutrient fertilizers based on them represent a promising research direction.

Among such natural sources, pomegranate peel (Punica granatum L.) is of particular interest. Pomegranate peel constitutes a significant portion of the fruit mass and is usually discarded as a waste product in the food industry. However, it represents a rich source of biologically active compounds.

Scientific studies have revealed that pomegranate peel contains punicalagin, ellagic acid, gallic acid, and various flavonoids [10,11].

These compounds contain numerous hydroxyl (–OH) and carboxyl (–COOH) functional groups capable of forming coordination complexes with metal ions. In this regard, pomegranate peel can be considered an inexpensive and biodegradable raw material suitable for use as a bio-ligand.

The technologies used for the extraction of polyphenols from pomegranate peel directly influence their effectiveness as bio-ligands. Experimental studies have demonstrated that polyphenols can be efficiently obtained using extraction methods such as hydroalcoholic (water–ethanol) extraction, ultrasound-assisted extraction, and fermentation techniques [12,13].

Variations in extraction conditions lead to changes in both the composition and concentration of phenolic compounds, which in turn affect the subsequent complex formation process. Therefore, controlling the chemical composition of bio-ligands is considered one of the key tasks.

Polyphenols possess the ability to form complexes with metal ions, and this process occurs through the dissociation of phenolic groups followed by their coordination with metal ion.

Various authors have emphasized that polyphenols possess a pronounced ability to bind metal ions [14].

Furthermore, researchers have highlighted that carboxyl and hydroxyl groups play a key role in metal binding [15].

It has been established that copper (Cu) is capable of forming stable complexes with organic compounds, which has been confirmed by experimental studies [16].

These findings theoretically substantiate that the polyphenols present in pomegranate peel are capable of forming stable complexes with Cu^{2+} and Zn^{2+} ions.

The interaction of pomegranate peel with metal ions has been confirmed by a number of experimental studies [17,18,19,20].

These studies demonstrate that pomegranate peel extract is capable of chemically interacting with metal ions and forming stable complexes.

Numerous studies on chelate-structured micronutrient fertilizers based on organic compounds have confirmed their high agrobiological efficiency. In particular, Zn–amino acid chelates have demonstrated high effectiveness in wheat cultivation. Organic fertilizers based on Cu have also shown positive effects on photosynthesis and crop productivity. This indicates that incorporating Cu and Zn ions into an organic matrix plays an important role in enhancing their efficiency [21].

Bio-ligands derived from pomegranate peel possess additional advantages, as they not only participate in complex formation but also exhibit antioxidant properties. This suggests that Cu and Zn complexes based on pomegranate peel may enhance plant resistance to environmental stress factors [22,23].

At the same time, an analysis of the available literature indicates the presence of a significant scientific gap. Although the polyphenols of pomegranate peel and their interactions with metal ions have been well studied, studies focused on the development of Cu and Zn complex micronutrient fertilizers based on these compounds and the evaluation of their agrobiological efficiency are scarce. This highlights the scientific novelty of the present research direction.

Results and Discussion.

Infrared (IR) spectroscopy was employed to determine the structure of the Cu-biochelate synthesized based on pomegranate peel extract and to identify the functional groups involved in the complex formation process. In this analysis, the spectra of the bio-ligand (pomegranate peel extract) and the resulting Cu complex were comparatively examined. (Figure 1)

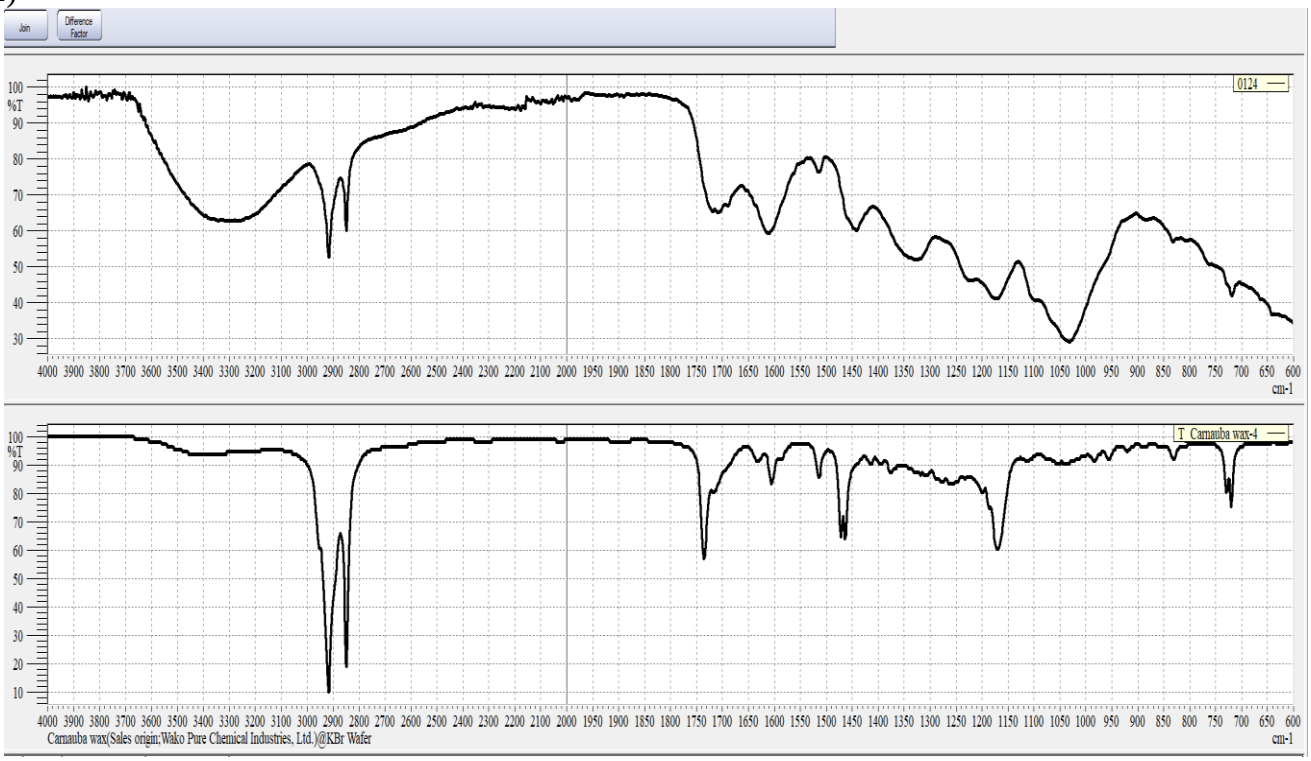


Figure 1. FTIR spectra of the bio-ligand and the Cu complex.

In the spectrum of the pomegranate peel extract, broad and intense absorption bands were observed in the range of 3200–3600 cm^{-1}, which are characteristic of phenolic and hydroxyl (–OH) groups. After complex formation with Cu^{2+} ions, a decrease in the intensity of these bands and a shift toward lower frequencies were observed. This phenomenon indicates the deprotonation of hydroxyl groups and the formation of coordination bonds with metal ions.

Absorptions corresponding to C–H stretching vibrations in the region of 2920–2850 cm^{-1} were observed in both spectra, and no significant changes were detected in this region. This suggests that the aliphatic part of the bio-ligand remained largely unchanged during the complex formation process.

The absorption bands in the range of 1700–1600 cm^{-1} correspond to the vibrations of carbonyl (C=O) groups and aromatic rings, which were clearly observed in the spectrum of the bio-ligand. After the formation of the complex, a shift of this band toward lower frequencies and a change in absorption intensity were detected. This indicates that carboxyl and aromatic groups participate in the formation of coordination bonds with Cu^{2+} ions.

Significant changes were also observed in the absorption bands within the 1600–1400 cm^{-1} region. This range is typically associated with the asymmetric and symmetric stretching vibrations of carboxylate (COO^-) groups. The observed changes in these absorption bands confirm that –COOH groups interact with the metal ions and are converted into the COO^- form during complex formation.

Changes in the intensity of absorption bands corresponding to C–O and C–O–C groups were also observed in the 1300–1000 cm^{-1} region. This indicates that phenolic and ether groups also participate in the complex formation process.

As the most significant result, new absorption bands appeared in the 600–400 cm^{-1} region in the spectrum of the Cu-biochelate. These absorptions are characteristic of Cu–O bonds and serve as direct evidence of the formation of coordination bonds between the metal and the bio-ligand.

Thus, the results of the FTIR spectroscopic analysis indicate that the phenolic and carboxyl groups present in the pomegranate peel extract form a stable biocomplex with Cu^{2+} ions. The shifts in spectral absorption bands and the appearance of new signals corresponding to Cu–O bonds provide clear confirmation of the complex formation process.

Experimental Section

Reagents and Equipment.

Reagents: 1% NaOH solution, 3% H_2O_2 solution, pomegranate peel, distilled water.

Equipment: Laboratory drying oven (Model: ShS 80-01 SPU), laboratory mill (Model: KIKA M20 WERKE), magnetic stirrer (Model: MC-7-X-550-PRO).

Preparation of Pomegranate Peel.

In this study, pomegranate (Punica granatum L.) peel was used as a source of bio-ligand. The raw material was obtained from a local market, thoroughly washed several times with distilled water, and cleaned of external impurities. The washed peels were then placed in a laboratory drying oven (Model: ShS 80-01 SPU) and dried at a temperature of 60–70 °C for 6–8 hours.

The dried material was ground using a laboratory mill (Model: KIKA M20 WERKE) to obtain particles with a size of 0.5–1 mm. The resulting material was stored in airtight containers for subsequent experiments**.**

Alkaline Extraction of the Bio-Ligand.

An alkaline extraction method was employed to activate the polyphenolic compounds present in pomegranate peel. For this purpose, the ground biomass was mixed with a 1% NaOH solution at a solid-to-liquid ratio of 1:10 (w/v).

The resulting mixture was stirred using a magnetic stirrer (Model: MC-7-X-550-PRO) at a temperature of 55–60 °C for 2 hours at a stirring speed of 300 rpm. During this process, the activity of organic compounds containing phenolic, flavonoid, and other functional groups present in the pomegranate peel was enhanced.

After completion of the extraction process, the mixture was filtered, and the solid biomass remaining on the filter was washed several times with distilled water to remove excess alkali residues.

Activation of Biomass Using an Oxidizing Agent.

To enhance the reactivity of functional groups, the biomass was treated with hydrogen peroxide (H_2O_2). For this purpose, the biomass remaining on the filter was mixed with a 3% H_2O_2 solution at a ratio of 1:10.

The mixture was stirred on a magnetic stirrer at a temperature of 50–55 °C for 1 hour at a stirring speed of 300 rpm. As a result of this oxidative treatment, the phenolic and carboxyl functional groups present in the biomass were activated, thereby increasing their ability to form complexes with metal ions.

After completion of the process, the mixture was filtered and the solid phase was washed several times with distilled water. The material was then dried at 60 °C for 4–5 hours. As a result, a bio-ligand capable of forming coordination bonds with metal ions was obtained.

Synthesis of Cu-Biochelate.

The synthesis of the Cu-based biochelate was carried out by reacting the obtained bio-ligand with a copper sulfate solution. For this purpose, the bio-ligand was mixed with a 1% $CuSO_4$ solution at a ratio of 1:20.

The resulting mixture was stirred on a magnetic stirrer at a temperature of 50–60 °C for 1–1.5 hours at a stirring speed of 300 rpm. During this process, the hydroxyl (–OH) and carboxyl (–COOH) functional groups present in the bio-ligand formed coordination complexes with Cu^{2+} ions.

After completion of the reaction, the mixture was filtered and the solid phase was separated as Cu-biochelate. The obtained product was washed with distilled water and dried at 60 °C. The product yield was 43%.

Infrared Spectroscopic Analysis.

Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was used to analyze the structure of the obtained bio-ligand and Cu-biochelate. The spectra were recorded in the range of 4000–400 cm^{-1}. The spectral analysis revealed that coordination bonds with the metal were formed involving functional groups such as –OH, –COOH, and C–O, and the formation of Cu–O bonds was also confirmed.

Conclusion. The results of this study demonstrate that the polyphenolic compounds present in pomegranate (Punica granatum L.) peel are capable of forming stable biochelates with Cu^{2+} ions through coordination bonding. FTIR spectroscopic analysis confirmed the active involvement of hydroxyl and carboxyl functional groups in the complex formation process and verified the formation of Cu–O bonds. The obtained biocomplex exhibits high bioavailability, low toxicity, and environmentally safe characteristics, making it a promising candidate for application as an efficient micronutrient fertilizer in modern agrochemistry.

References

1. Ahmed, N.; Zhang, L.; Li, J. Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. Scientia Horticulturae, 2024, 318, 112600.
2. Neocleous, D.; Koukounaras, A.; Siomos, A. Impact of chelated or inorganic zinc applications in hydroponics. Agronomy, 2020, 10(6), 881.
3. Kumar, V.; Pandita, S.; Sidhu, G.P.S. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants. Chemosphere, 2021, 262, 127810.
4. Rahman, N.; Arshad, M.; Afzal, M. Bioavailability, speciation, and crop responses to copper, zinc, and boron fertilization. Agronomy, 2022, 12(8), 1837.
5. Ghasemi, S.; Khoshgoftarmanesh, A.H.; Afyuni, M. Effectiveness of zinc-amino acid chelates in wheat. European Journal of Agronomy, 2013, 45, 68–74.
6. Souri, M.K. Beneficial effects of foliar application of organic chelate fertilizers. Advances in Horticultural Science, 2018, 32, 321–330.
7. López-Rayo, S.; Hernández, D.; Lucena, J.J. EDDS ligand as a soil solubilizer of Fe, Mn, Zn and Cu. Environmental Research, 2023, 216, 114613.
8. Yin, F.; Li, J.; Wang, Y. Biodegradable chelating agents for enhancing phytoremediation. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 281, 116113.

9. Leporino, M.; De Mastro, F.; Santamaria, P. Biochelates as eco-friendly alternatives to synthetic chelates. Scientia Horticulturae, 2025, 330, 112901.
10. Mo, Y.; Zhao, Y.; Wang, L. Pomegranate peel as a source of bioactive compounds. Frontiers in Nutrition, 2022, 9, 887113.
11. Singh, J.; Kaur, H.P.; Verma, A. Pomegranate peel phytochemistry and applications. ACS Omega, 2023, 8, 35452–35469.
12. Huang, Z.; Foo, S.C.; Choo, W.S. Extraction of polyphenols from pomegranate peel. Food & Function, 2025, 16, 210–225.
13. Buenrostro-Figueroa, J.J.; et al. Extraction of polyphenols from pomegranate peel by fermentation. Fermentation, 2023, 9(6), 530.
14. Schmidt, M.A.; Martinez, C.E. Metal mobilization by natural polyphenols. Chemosphere, 2013, 93, 2255–2262.
15. Pan, J.; Li, X.; Zhang, Y. Adsorption mechanism of copper and zinc by biosorbents. Science of the Total Environment, 2022, 805, 150312.
16. Steinberg, S.M.; et al. Copper complexation by dissolved organic matter. Environments, 2018, 5(11), 125.
17. Ben-Ali, S.; Jaouali, I.; Ouederni, A. Adsorption of copper using pomegranate peel. Journal of Cleaner Production, 2017, 142, 3893–3900.
18. El-Ashtoukhy, E.S.Z.; Amin, N.K.; Abdelwahab, O. Removal of copper ions using pomegranate peel. Desalination, 2008, 223, 162–173.
19. Mohammadi, A.; et al. Green synthesis of ZnO nanoparticles using pomegranate peel. Scientific Reports, 2025, 15, 20853.
20. Bouricha, M.; et al. Green synthesis of CuO nanoparticles using pomegranate peel extract. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 152, 110598.
21. Ma, J.; et al. Copper and iron foliar fertilizers in grape cultivation. Scientia Horticulturae, 2019, 246, 440–447.
22. Saparbekova, A.A.; et al. Phenolic compounds from pomegranate peel. Molecules, 2022, 27, 9827.
23. Shabir, I.; et al. Bioactive potential of punicalagin. Food Research International, 2024, 180, 113785.