Статья поступила в редакцию: 29.09.2026
Статья принята к публикации: 23.10.2026
Статья опубликована: 07.11.2026

УДК 543.4:542.61:535.24:546.72

DOI: 10.32743/UniChem.2026.149.11.23614

Разработка сорбционно-спектроскопического способа определения иона Fe(III) с помощью иммобилизированного метилтимолового синего

Давронова Норнисо Фахриддин кизи
PhD, ст. преп
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: davronovanorniso@gmail.com

Сманова Зулайхо Асаналиевна
д-р хим. наук, проф.
Национальный университет Узбекистана
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: smanova.chem@mail.ru

Development of a new sorption-spectroscopic method for the determination of Fe(III) ion using immobilized methylthymol blue

Davronova Norniso
senior lecturer
in Chemistry PhD Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Smanova Zulaikho
doctor of Chemical Sciences, Professor
of the National University of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В данной работе разработан новый сорбционно-спектроскопический способ определения ионов железа(III) с использованием метилтимолового синего, иммобилизованного на волокнистом сорбенте. Цель исследования заключалась в выборе оптимального сорбента, расчет максимальных спектров отражения комплекса иммобилизованного метилтимолового синего с ионами железа (III) с помощью функции Кубелки — Мунка, а также изучение подчинения процесса образования комплекса Fe (III) с иммобилизованным метилтимоловым синим закону Бугера — Ламберта — Бера. В качестве сорбентов были исследованы волокна CMA1, PPD, PPF и PPA1. На основании полученных

Библиографическое описание: Давронова Н.Ф. кизи, Сманова З.А. Разработка сорбционно-спектроскопического способа определения иона Fe(III) с помощью иммобилизированного метилтимолового синего // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 11(149). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23614

спектральных характеристик и аналитических показателей в качестве оптимального сорбента выбрано волокно PPA1. Максимум поглощения комплекса, образованного иммобилизованным метилтимоловым синим с ионами железа(III), наблюдался при длине волны 615 нм. Установлено, что разница между длинами волн, соответствующими максимумам поглощения метилтимолового синего и образовавшегося комплекса железа(III), составляет 175 нм. Полученные результаты подтверждают возможность использования иммобилизованного метилтимолового синего для определения ионов железа(III). Установлено, что зависимость оптической плотности образовавшегося комплекса железа(III) от концентрации подчиняется закону Бугера — Ламберта — Бера в диапазоне концентраций 10–100 мкг/мл.

Разработанный способ характеризуется простотой выполнения, экспрессностью и возможностью определения следовых количеств ионов железа(III) в водных объектах. Полученные результаты подтверждают перспективность применения иммобилизованного метилтимолового синего для сорбционно-спектроскопического анализа и экологического контроля содержания железа в природных и питьевых водах.

Abstract

In this work, a new sorption-spectroscopic method for the determination of iron(III) ions using methylthymol blue immobilized on a fibrous sorbent has been developed. The aim of the study was to select the optimal sorbent, calculate the maximum reflectance spectra of the complex of immobilized methylthymol blue with iron(III) ions using the Kubelka–Munk function, and study whether the formation of the Fe(III) complex with immobilized methylthymol blue obeys the Bouguer–Lambert–Beer law. Fibers CMA1, PPD, PPF, and PPA1 were studied as sorbents. Based on the obtained spectral characteristics and analytical indicators, PPA1 fiber was selected as the optimal sorbent. The absorption maximum of the complex formed by immobilized methylthymol blue with iron(III) ions was observed at a wavelength of 615 nm. It was established that the difference between the wavelengths corresponding to the absorption maxima of methylthymol blue and the formed iron(III) complex is 175 nm. The obtained results confirm the possibility of using immobilized methylthymol blue for the determination of iron(III) ions. It was found that the dependence of the optical density of the formed iron(III) complex on concentration obeys the Bouguer–Lambert–Beer law in the concentration range of 10–100 μg/mL. The developed method is characterized by simplicity of implementation, rapidity, and the possibility of determining trace amounts of iron(III) ions in water bodies. The obtained results confirm the prospects of using immobilized methylthymol blue for sorption-spectroscopic analysis and environmental monitoring of iron content in natural and drinking waters.

Ключевые слова: ионы железа(III), метилтимоловый синий, иммобилизация, сорбционно-спектроскопический метод, волокнистый сорбент, комплексообразование.

Keywords: iron(III) ions, methylthymol blue, immobilization, sorption-spectroscopic method, fibrous sorbent, complex formation.

Введение

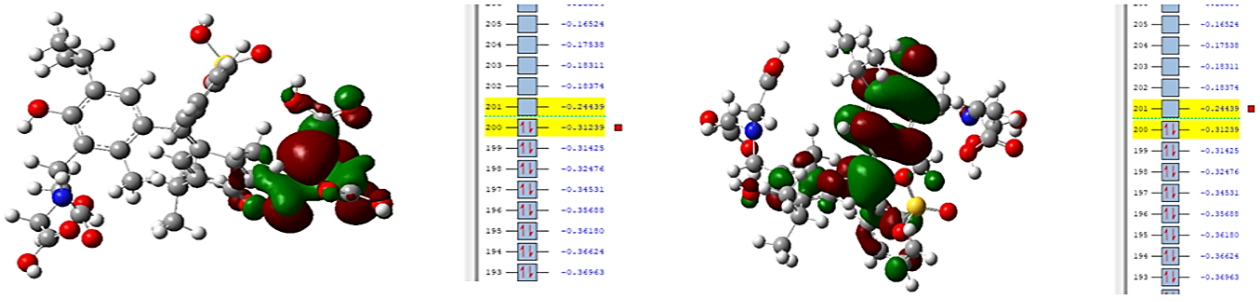
Железо – один из микроэлементов, важных для организма человека. Недостаток элемента железа в организме человека вызывает различные сосудистые заболевания [1]. Однако стоит отметить, что избыток элемента железа в организме человека вызывает поражение печени; поджелудочной железы и миокарда – развитие гемохроматоза [2]. Железо играет важную роль в развитии экосистемы; сельского хозяйства и промышленности; но в то же время является загрязнителем водоемов [3]. Тяжелые металлы в питьевой воде представляют угрозу для здоровья человека. Поэтому необходимо определять и контролировать количество ионов железа в объектах окружающей среды.

Предложен простой и быстрый метод твердофазной спектрофотометрии для определения свободного железа (III) в экологических и биологических пробах [4]. В качестве лигандов использованы динатриевая соль 1-нитрозо-2-нафтол-3,6-дисульфокислоты (соль Нитрозо Р) и бромид гексадецилтриметиламмония [7]. Разработан проточно-инжекционный спектрофотометрический метод определения количества растворенного и общего железа в водопроводной и природной водах. В пробах природных вод определялось каталитическое действие на окисление N,N-диметил-*n*-фенилендиамина [10]. Спектрофотометрический метод определения ионов железа с использованием различных лигандов не допускает широкого применения из-за своей селективности и низкой чувствительности. Ион железа (III) можно определить методом атомно-абсорбционной спектрометрии с помощью иммобилизованной сульфасалициловой кислоты иммобилизованием сульфарсазенового лиганда на модифицированном полиакрилонитрилом полиэтиленполиаминовом волокне [13] .Применена масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) для определения элементов железа и йода в семенах арбуза [6], определения железа и многих микроэлементов в растении, листьях и семенах растения акчангал [9], определение 44 макро- и микроэлементов в цветках Tanacetum vulgare [8]. Однако эти методы требуют дорогостоящего оборудования. Разработаны также сорбционно-спектроскопические методы определения тяжелых и токсичных металлов с использованием иммобилизованных органических реагентов. Например, иммобилизованный ион висмута ксилоловый оранжевый [5], ион ртути(II), иммобилизованный на волокне PPA1 [11], иммобилизованный динатриевый реагент 1,8-диоксинафталин-3,6-дисульфокислоты для обнаружения ионов хрома [12], ионы марганца, иммобилизованные ализарином.

В настоящее время одним из широко развитых методов является абсорбционная спектрофотометрия. Это улучшенная версия спектрофотометрического метода, поскольку чувствительность спектрофотометрического метода составляет 10^{-6}-10^{-8}. Если количество пробы небольшое, ее следует упарить без предварительного концентрирования. Сорбционно-спектроскопический способ можно использовать для определения следовых количеств металла непосредственно с помощью иммобилизованного на волокне органического реагента. Этот модифицированный способ включает несколько процессов: концентрация, определение непосредственно в твердой фазе, не отделяя ион металла [14].

Методы и материалы

0,5585 г металлического железа высокой чистоты растворяют в 10 мл смеси соляной и азотной кислот (3:1), разбавляют до 50 мл водой и кипятят до удаления оксидов азота, 5585мг/мл хлоридов Fe^{3+}. образуется стандартный раствор нитратов. Буферные растворы готовили на основании литературных данных. Для приготовления 0,01 М раствора метилтимолового синего отмеряют 0,76085 г порошка реагента на аналитических весах и добавляют дистиллированную воду в колбу емкостью 100 мл. Для иммобилизации выбранного волокна взвешиваем 0,2 г на аналитических весах и активируем его 0,1 Н раствором HCl (24 часа). После активации промываем дистиллированной водой до pH=7. Волокно держат во влажном состоянии в чашке Петри, и добавлением 10 мл 0,01М раствора нашего реагента перемешиваем мешалкой [1]. Для измерения проб использовали аналитические весы ABS 120-4N (Китай). Измерение среды реагентов проводили с помощью pH-метра «PHS-3E» (Китай). Коэффициент отражения иммобилизованных волокон измеряли с помощью спектрофотометра X-Rite Eye one pro (380 – 730 нм), а светопоглощение реакционноспособных растворов измеряли с помощью спектрофотометра «EMC-30PC-UV Spectrophotometer» и «UV-5100 UV VIS».



а) **б)**

Рисунок 1. Метилтимоловый синий: а) высшая занятая молекулярная орбиталь (HOMO); б) низшая свободная молекулярная орбиталь (LUMO)

Результаты и обсуждение

Подобрали сорбент для иммобилизации органического реагента и определили порядок добавления компонентов в процесс иммобилизации. Установлены оптимальные условия образования комплекса иммобилизованного органического реагента метилтимолового синего (МТС) с Fe^{3+}. В исследовательской работе изучены временные зависимости комплексообразования, оптимальные значения pH и оптимальные буферные растворы, порядок добавления буферных растворов при образовании комплексных соединений и другие особенности.

При выборе оптимальных условий иммобилизации органических реагентов на волокнистых сорбентах от нескольких типов сорбентов отбирали по 0,2000 г в аналитическом масштабе и активировали стандартным раствором 0,1 М соляной кислоты в течение 24 часов, затем промывали дистиллированной водой и хранили в специальной чашке Петри (во влажном состоянии). Для анализа были выбраны волокна CMA1, PPD, PPF и PPA1, 0,2000 г выбранных волокнистых сорбентов поместили в стакан, добавляли 10 мл

0,1 % раствора нашего реагента метилтимолового синего и перемешивали в течение 5 – 10 минут. Спектр отражения иммобилизованных волокон измеряли на спектрофотометре X-rite one (Швесцария).

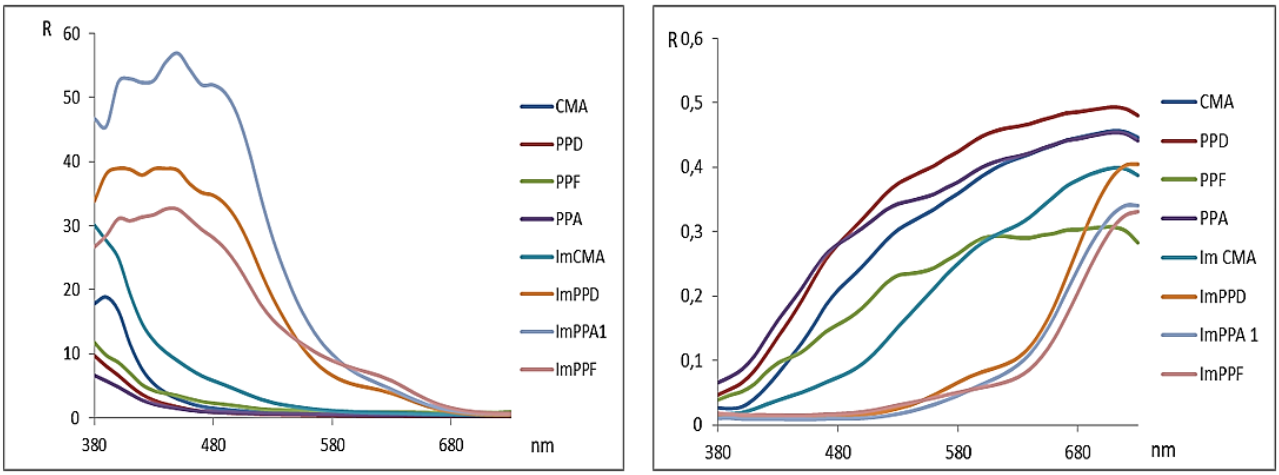


Рисунок 2. Иммобилизации различных волокнистых сорбентов органическим реагентом метилтимоловым синим результаты расчета спектров отражения по функции Кубелки — Мунка

Из приведенных выше результатов анализа видно, что органический реагент метилтимоловый синий, будучи иммобилизованным на сорбенте ППА-1, показал наиболее высокий аналитический сигнал. В дальнейших научно-исследовательских работах для иммобилизации метилтимолового синего использовался только сорбент ППА-1.

Определение максимума поглощения комплексного соединения железа(III). Для определения максимума поглощения комплексов железа был проведён эксперимент согласно методике, разработанной для иммобилизованного метилтимолового синего. В мерную колбу вместимостью 25 мл вносили 1 мл раствора железа, содержащего 10 мкг железа. Затем добавляли 10 мл универсального буферного раствора с pH = 4. После этого в колбу помещали носители, иммобилизованные выбранными органическими реагентами. Полученные растворы тщательно перемешивали, после чего измеряли их оптическую плотность на спектрофотометре при различных длинах волн в кювете с толщиной поглощающего слоя 1 см.

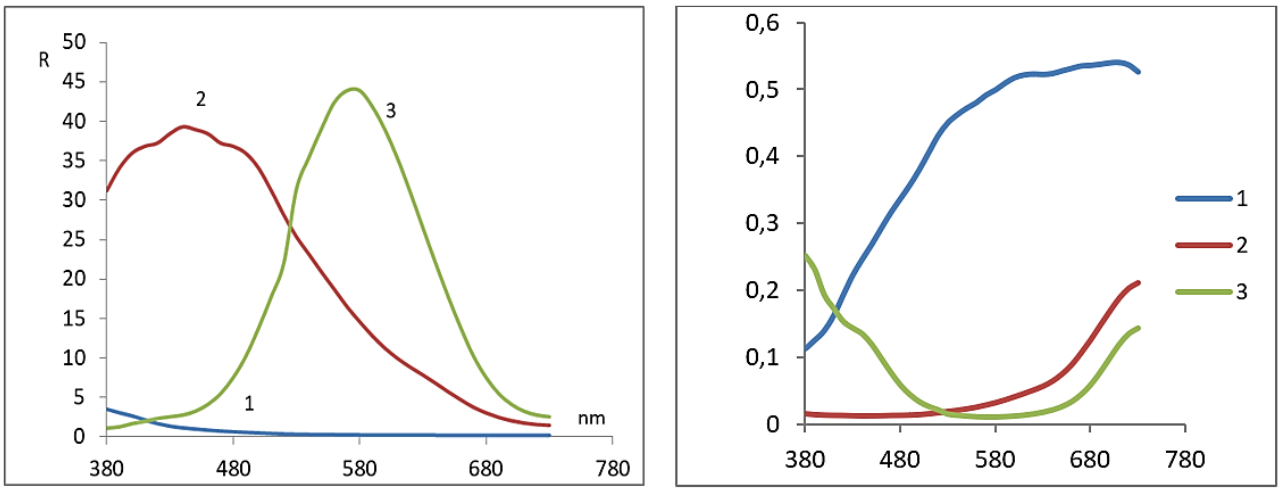


Рисунок 3. Результаты расчета спектров отражения комплекса иммобилизованного МТС с ионом Fe^{3+} с использованием функции Кубелки-Мунка. 1 – сорбент ППА-1; 2 – иммобилизованный метилтимоловый синий (МТС) 440 нм; 3 – образовавшийся комплекс железа (III) 615 нм

Иммобилизованный метилтимоловый синий реагирует с ионами железа (III) с образованием комплекса железа. Образующийся комплекс железа проявляет аналитический сигнал при 615 нм. Так как контрастность между иммобилизованным метилтимоловым синим и образовавшимся комплексом превышает 175 нм, доказана возможность использования иммобилизованного метилтимолового синего в качестве аналитического реагента для определения ионов железа (III).

Подчинение закона Бугера — Ламберта — Бера комплексом, образованным ионами железа(III) с иммобилизованным метилтимоловым синим. Экспериментально проверено подчинение закону Бугера-Ламберта-Бера комплексов, образованных ионами железа (III) с иммобилизованным реагентом метилтимоловым синим. В колбы емкостью 50 мл вносили по 10 мл рабочих растворов солей железа (III) с концентрацией 10–100 мкг/мл, для достижения оптимального значения pH (pH=4 для Fe (III)) добавляли по 2 мл универсального буфера и в течение 10 минут проводили сорбцию реагентом метилтимоловым синим, иммобилизованным на ППА-1. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

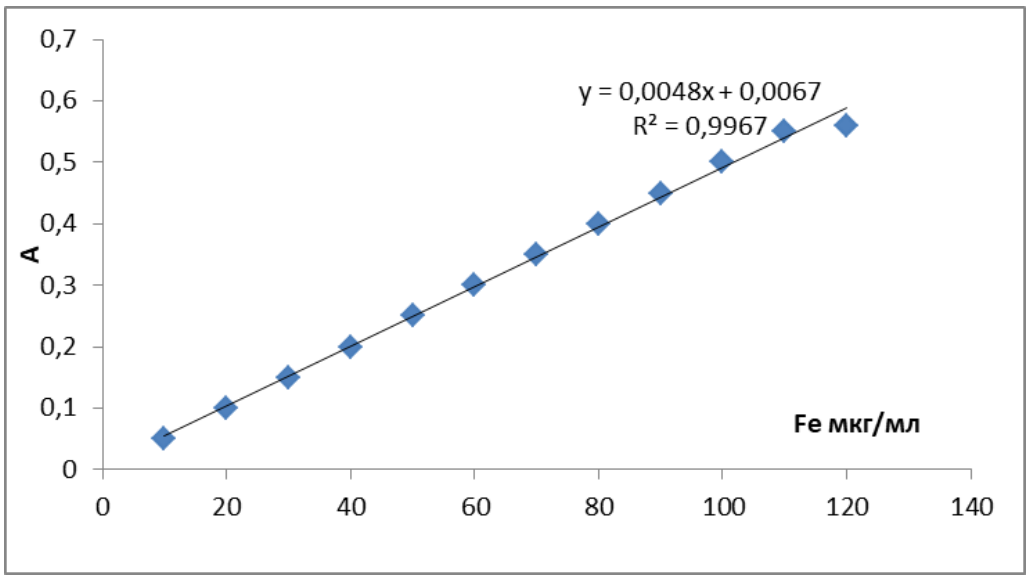


Рисунок 4. Подчинение закону Бугера-Ламберта-Бера комплекса ионов железа с иммобилизованной МТС

Делая выводы по рис. 4, следует отметить, что прямолинейная зависимость на градуировочном графике для ионов железа (III) составила 10–100 мкг/мл. Эти значения считаются достаточными для определения следовых количеств исследуемых ионов в объектах окружающей среды. Также был найден коэффициент корреляции, который в обоих случаях оказался близок к 1, что свидетельствует о высокой чувствительности разработанного способа.

Заключение

В результате проведенного исследования разработан сорбционно-спектроскопический способ определения ионов железа(III) с использованием метилтимолового синего, иммобилизованного на волокнистом сорбенте. На основании сравнительного исследования сорбентов CMA1, PPD, PPF и PPA1 в качестве оптимального сорбента для иммобилизации метилтимолового синего выбрано волокно PPA1, обеспечивающее наиболее выраженный аналитический сигнал. Полученные результаты показывают, что разработанный способ отличается простотой, экспрессностью и возможностью определения железа(III) в водных объектах. Способ может быть использован для аналитического контроля содержания ионов железа в природных и питьевых водах.

Список литературы

1. Амелин В.Г., Третьяков А.В. Ткани из искусственных и натуральных волокон с иммобилизованными реагентами в химических тест-методах анализа // Ткани из искусственных и натуральных волокон с иммобилизованными реагентами в химических тест-методах анализа // Журнал аналит. химии. – 2006. – Т. 61, № 4. – С. 430–435.
2. Запорожец О.А., Гавер О.М., Сухан В.В. Иммобилизация органических реагентов на поверхности носителей // Иммобилизация органических реагентов на поверхности носителей // Успехи химии. – 1997. – Т. 66, № 7. – С. 701–712.

3. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии // Справочник по аналитической химии. // М.:Химия. – М.: Химия, 1989. – С. 446–445.
4. Alberti, G., Emma, G., Colleoni, R., Nurchi, V.M., Pesavento, M. & Biesuz, R // Simple solid-phase spectrophotometric method for free iron(III) determination // Arabian Journal of Chemistry. – 2019. – Т. 12, № 4. – P. 573–579. – DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.08.017.
5. Ashirov, M.A., Yusupova, M.R., Akhmadjanov, U.G., Baigenzhenov, O., Berdimurodov, E. T // Sulfarsazen-immobilized PPA Matrix as a New Efficient Analytical Reagent for Hg(II) Determination // Analytical and Bioanalytical Chemistry Research. – 2023. – P. 267–275.
6. Atakulova, N.B.Q., Asqarov, I.R. & Anvarova, M.M. Q // “Shirin” navli tarvuz urug’ining makro va mikroelementlarini induktiv bog’langan plazmali mass-spektrometriya metodi bilan aniqlash (icp-ms) // Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine.l. – 2022. – Т. 1, № 5. – P. 114–122. – DOI: 10.55475/jcgtm/vol1.iss5.2022.108.
7. Cheng, F., Zhang, T., Sun, T., Wang, Y., Zhou, C., Zhu, H. & Li, Y // A simple, sensitive and selective spectrophotometric method for determining iron in watersamples // Microchemical Journal. – 2021. – P. 106–154. – DOI: 10.1016/j.microc.2021.106154.-C.
8. Ibragimov, A. & Odilova, N // Study of quantitative elemental composition of tanacetum vulgare l. Plant. // Scientific Journal of the Fergana State University, 29(1). – 2023. – P. 112–116. – DOI: 10.56292/sjfsu/vol29_iss1/a113.
9. Ibroximov, A., Ibroximova, N. & Jalolov, I [Электронный ресурс]. // Oqchangal (nitraria sp) o‘simligining bargi va urug’i makro va mikroelement tarkibini icp-ms usulida o‘rganish //.Farg’ona Davlat Universiteti, 30(3), 142. Retrieved from. – 2024. URL: https://journal.fdu.uz/index.php/sjfsu/article/view/3963 (дата обращения: 25.09.2026).
10. Lunvongsa, S., Oshima, M. & Motomizu, S // Determination of total and dissolved amount of iron in water samples using catalytic spectrophotometric flow injection analysis. // Talanta. – 2006. – Т. 68, № 3. – P. 969–973. – DOI: 10.1016/j.talanta.2005.06.067.
11. Madatov, U., Rakhimov, S., Normatov, B., Khalilova, L., Smanova, Z. Immobilized Reagent Disodium Salt of 1, 8-Dioxynaphthalene-3,6-Disulfonic Acids for the Determination of Chromium Ions // Immobilized Reagent Disodium Salt of 1, 8-Dioxynaphthalene-3,6-Disulfonic Acids for the Determination of Chromium Ions // AIP Conference Proceedings. – 2022. – P. 287–289.
12. Madatov, U., Rakhimov, S., Shahidova, D., Basant, L., Berdimurodov, E. A new, green, highly effective procedure for manganese determination using alizarin-3-methylamino-N,N-diacetic acid immobilised on a polymer matrix // A new, green, highly effective procedure for manganese determination using alizarin-3-methylamino-N,N-diacetic acid immobilised on a polymer matrix // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2022. – P. 567–577.
13. Ruzmetov, U.U., Jumaeva, E.Sh., Orziqulov, B.T. Smanova // Determination of iron in water by flame atomic absorption spectrometry with sorption preconcentration // Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. – 2023. – P. 112–117.

14. Smanova, Z., Normatov, B., Ahmadjonov, U., Baigenzhenov, O., Hosseini-Bandegharaei, A. Sorption-spectrophotometric determination of bismuth ion (III) using immobilised xylenol orange on modified polyacrylonitrile // Sorption-spectrophotometric determination of bismuth ion (III) using immobilised xylenol orange on modified polyacrylonitrile. // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2024. – P. 195–203.

References

1. Amelin V.G., Tret'yakov A.V. Tkani iz iskusstvennykh i natural'nykh volokon s immobilizovannymi reagentami v khimicheskikh test-metodakh analiza // Tkani iz iskusstvennykh i natural'nykh volokon s immobilizovannymi reagentami v khimicheskikh test-metodakh analiza // Zhurnal analit. khimii. – 2006. – Vol. 61, No. 4. (In Russ.).
2. Zaporozhets O.A., Gaver O.M., Sukhan V.V. Immobilizatsiya organicheskikh reagentov na poverkhnosti nositelej // Immobilizatsiya organicheskikh reagentov na poverkhnosti nositelej // Uspekhi khimii. – 1997. – Vol. 66, No. 7. (In Russ.).
3. Lur'e Yu.Yu. Spravochnik po analiticheskoj khimii // Spravochnik po analiticheskoj khimii. // M.:Khimiya. – 1989. (In Russ.).
4. Alberti, G., Emma, G., Colleoni, R., Nurchi V.M., Pesavento, M. & Biesuz, R. (2019b) // Simple solid-phase spectrophotometric method for free iron(III) determination // Arabian Journal of Chemistry. – Vol. 12, No. 4. – P. 573–579. – DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.08.017.
5. Ashirov M.A., Yusupova M.R., Akhmadjanov U.G., Baigenzhenov, O., Berdimurodov, E. T // Sulfarsazen-immobilized PPA Matrix as a New Efficient Analytical Reagent for Hg(II) Determination // Analytical and Bioanalytical Chemistry Research. – 2023. – P. 267–275.
6. Atakulova N., Asqarov I. & Anvarova M // “Shirin” navli tarvuz urug’ining makro va mikroelementlarini induktiv bog’langan plazmali mass-spektrometriya metodi bilan aniqlash (icp-ms) // Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine.l. – 2022. – Vol. 1, No. 5. – P. 114–122. – DOI: 10.55475/jcgtm/vol1.iss5.2022.108.
7. Cheng, F., Zhang, T., Sun, T., Wang, Y., Zhou, C., Zhu, H. & Li, Y // A simple, sensitive and selective spectrophotometric method for determining iron in watersamples //. MicrochemicalJournal. – 2021. – P. 106–154. – DOI: 10.1016/j.microc.2021.106154.
8. Ibragimov, A. & Odilova, N // Study of quantitative elemental composition of tanacetum vulgare l. Plant. // Scientific Journal of the Fergana State University, 29(1). – 2023. – DOI: 10.56292/sjfsu/vol29_iss1/a113.
9. Ibroximov, A., Ibroximova, N. & Jalolov, I [Электронный ресурс]. // Oqchangal (nitraria sp) o‘simligining bargi va urug’i makro va mikroelement tarkibini icp-ms usulida o‘rganish //.Farg’ona Davlat Universiteti, 30(3), 142. Retrieved from. – 2024. – URL: https://journal.fdu.uz/index.php/sjfsu/article/view/3963 (accessed: 25.09.2026).
10. Lunvongsa, S., Oshima, M. & Motomizu, S // Determination of total and dissolved amount of iron in water samples using catalytic spectrophotometric flow injection analysis. // Talanta. – 2006. – Vol. 68, No. 3. – P. 969–973. – DOI: 10.1016/j.talanta.2005.06.067.

11. Madatov, U., Rakhimov, S., Normatov, B., Khalilova, L., Smanova, Z. Immobilized Reagent Disodium Salt of 1, 8-Dioxynaphthalene-3,6-Disulfonic Acids for the Determination of Chromium Ions // Immobilized Reagent Disodium Salt of 1, 8-Dioxynaphthalene-3,6-Disulfonic Acids for the Determination of Chromium Ions // AIP Conference Proceedings. – 2022. – P. 287–289.
12. Madatov, U., Rakhimov, S., Shahidova, D., Basant, L., Berdimurodov, E. A new, green, highly effective procedure for manganese determination using alizarin-3-methylamino-N,N-diacetic acid immobilised on a polymer matrix // A new, green, highly effective procedure for manganese determination using alizarin-3-methylamino-N,N-diacetic acid immobilised on a polymer matrix // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2022. – P. 567–577.
13. Ruzmetov U.U., Jumaeva E.Sh., Orziqulov B.T. Smanova // Determination of iron in water by flame atomic absorption spectrometry with sorption preconcentration // Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. – 2023. – P. 112–117.
14. Smanova, Z., Normatov, B., Ahmadjonov, U., Baigenzhenov, O., Hosseini-Bandegharaei, A. (2024) // Sorption-spectrophotometric determination of bismuth ion (III) using immobilised xylenol orange on modified polyacrylonitrile. // International Journal of Environmental Analytical Chemistry P. 195–203. – 2024. – P. 195–203.