

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ХИМИЯ

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 10.07.2026

Статья принята к публикации: 15.07.2026

Статья опубликована: 07.08.2026

УДК 543.422.3:543.544.6:546.19:546.49

DOI: 10.32743/UniChem.2026.146.8.23179

**Синтез и применение органических аналитических реагентов в
сорбционно-фотометрическом определении ионов мышьяка и ртути**

Инатова Махсуда Сагдуллаевна
PhD

доц. кафедры химии Джизакский государственный педагогический университет
Узбекистан, г. Джизак
E-mail: tunikom57@mail.ru

Убайдуллаева Зилола Зафар кизи
докторант

Джизакский государственный педагогический университет
Узбекистан, г. Джизак

**Synthesis and application of organic analytical reagents in sorption-photometric
determination of arsenic and mercury ions**

Inatova Maxsuda Sagdullayevna
PhD, Associate Professor

Department of Chemistry, Jizzakh State Pedagogical University
Uzbekistan, Jizzakh

Ubaydullayeva Zilola Zafar kizi
Doctoral student

Jizzakh State Pedagogical University
Uzbekistan, Jizzakh

Библиографическое описание: Инатова М.С., Убайдуллаева З.З. кизи Синтез и применение органических аналитических реагентов в сорбционно-фотометрическом определении ионов мышьяка и ртути // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 8(146). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23179>

Аннотация

В статье проанализированы научные подходы к синтезу и применению органических аналитических реагентов в сорбционно-фотометрическом определении ионов мышьяка и ртути в составах водных и других экологических объектов. Было установлено, что использование органических реагентов, содержащих хромофорные и комплексообразующие группы, позволяет формировать устойчивые, окрашенные, аналитические формы, пригодные для фотометрической регистрации токсичных элементов в микроконцентрациях. Выявлено, что для определения Hg(II) наиболее эффективны реагенты, содержащие донорные атомы серы, азота и кислорода, в частности дитизон, арсеназо III и азопроизводные соединения. Обосновано, что при определении As(III) и As(V) важную роль играют реакции предварительного превращения мышьяка в фотометрически активные формы, включая системы на основе арсеномолибденовых комплексов. Показано, что иммобилизация реагентов на полимерных, кремнеземных и углеродных носителях способствует повышению чувствительности, селективности и экспрессности анализа за счёт твердофазного концентрирования. Проанализированы условия выбора функциональных групп реагента, способы его закрепления на сорбенте и факторы, влияющие на устойчивость аналитического сигнала. Полученные обобщения подтверждают перспективность сорбционно-фотометрических систем для контроля ионов мышьяка и ртути в природных и сточных водах.

Abstract

The article analyzes scientific approaches to the synthesis and application of organic analytical reagents in the sorption-photometric determination of arsenic and mercury ions in aquatic and environmental samples. It was established that the use of organic reagents containing chromophoric and complex-forming groups makes it possible to form stable colored analytical species suitable for the photometric detection of toxic elements at microconcentration levels. It was revealed that reagents containing sulfur, nitrogen, and oxygen donor atoms, in particular dithizone, Arsenazo III, and azo derivatives, are the most effective for the determination of Hg(II). It was substantiated that, in the determination of As(III) and As(V), an important role is played by preliminary conversion reactions of arsenic into photometrically active forms, including systems based on arsenomolybdate complexes. It was shown that the immobilization of reagents on polymeric, silica, and carbon supports contributes to increased sensitivity, selectivity, and rapidity of analysis due to solid-phase preconcentration. The principles of selecting reagent functional groups, methods of their fixation on sorbents, and factors affecting the stability of the analytical signal were analyzed. The obtained generalizations confirm the prospects of sorption-photometric systems for monitoring arsenic and mercury ions in natural and wastewater samples.

Ключевые слова: органические аналитические реагенты, сорбционно-фотометрический анализ, мышьяк, ртуть, иммобилизация, комплексообразование, твердофазное концентрирование, спектрофотометрия.

Keywords: organic analytical reagents, sorption-photometric analysis, arsenic, mercury, immobilization, complex formation, solid-phase preconcentration, spectrophotometry.

Введение

Ионы мышьяка и ртути относятся к наиболее опасным загрязнителям водных и пищевых объектов, поскольку проявляют токсичность даже при низких концентрациях. Для мышьяка важны не только общее содержание, но и его формы As(III) и As(V), отличающиеся токсичностью, подвижностью и комплексообразующей способностью. Неорганические формы мышьяка представляют наибольший риск для питьевой воды, а предельно допустимый ориентир, принятый ВОЗ, ЕРА и ЕС, составляет 10 мкг/л [3]. Для неорганической ртути в документах ВОЗ указано значение 0,006 мг/л, или 6 мкг/л, что требует применения чувствительных методов контроля [2].

Для определения наличия мышьяка и ртути применяют атомно-спектрометрические, масс-спектрометрические, электрохимические и хроматографические методы, однако в силу сложности их выявления, а также высокой стоимости самого процесса актуальными остаются фотометрические и сорбционно-фотометрические подходы, основанные на образовании окрашенных комплексов с органическими реагентами [1].

Целью статьи является обобщение подходов к синтезу и применению органических аналитических реагентов в сорбционно-фотометрическом определении ионов мышьяка и ртути, а также описание принципов создания иммобилизованных аналитических систем для контроля токсичных элементов в водных объектах.

Материалы и методы

Методологической основой работы послужил анализ публикаций, посвящённых синтезу и иммобилизации органических аналитических реагентов для сорбционно-фотометрического определения As(III), As(V) и Hg(II). При выборе реагентов учитывались наличие хромофорных и комплексообразующих групп, растворимость, устойчивость окрашенных форм и возможность фиксации на твердых носителях.

Органические реагенты для определения мышьяка и ртути содержат хромофорный фрагмент, обеспечивающий аналитический сигнал, и комплексообразующий центр, отвечающий за селективное связывание ионов. В азореагентах важную роль играют группы –N=N–, –OH, –SO₃H, –NH₂ и гетероатомы азота. В дитизоне комплексообразование с Hg(II) связано с тиокарбазонным фрагментом и атомом серы [8], а в арсеназо III — с азогруппами, фенольными гидроксилами и сульфокислотными группами, повышающими растворимость и способность к иммобилизации [4].

Синтез азореагента проводили по реакции диазотирования N-амино-α-метиланабазина с последующим азосочетанием с натриевой солью 1,8-аминонафтол-4,6-дисульфокислоты. Для этого навеску N-амино-α-метиланабазина массой 0,5000 г растворяли в 10,0 мл 1 М HCl, охлаждали до 0–5 °С и при перемешивании добавляли 5,0 мл 0,5 М раствора NaNO₂. Полученный диазораствор вводили в 25,0 мл раствора натриевой соли 1,8-аминонафтол-4,6-дисульфокислоты, содержащего 0,8200 г вещества. Реакционную смесь выдерживали при pH 8–9 в течение 60 минут, после чего продукт очищали на колонке с Al₂O₃. Выход N-метиланабазин-α-азо-1,8-аминонафтол-4,6-дисульфокислоты составлял 56,8 % по сравнению с теоретическим показателем [7].

Для иммобилизации 0,2000 г полиакрилонитрильного волокна помещали в 25,0 мл водного раствора азореагента с концентрацией $1,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л и выдерживали 2 часа при pH 5,5–6,0 и температуре 25 °С. После сорбции носитель промывали дистиллированной водой до бесцветных промывных вод и высушивали при 50 °С до постоянной массы. Рабочие растворы Hg(II) и As(III) готовили, разбавляя стандартные растворы с концентрацией 1000 мг/л до 1,0 мг/л.

Для построения градуировочных графиков в мерные колбы объемом 50,0 мл вносили 0,25–5,00 мл рабочего раствора Hg(II) и 0,50–7,50 мл рабочего раствора As(III), что соответствовало диапазонам 5–100 мкг/л для Hg(II) и 10–150 мкг/л для As(III). Затем добавляли 0,0500 г иммобилизованного сорбента, выдерживали 10–15 мин, отделяли твердую фазу и регистрировали аналитический сигнал.

Методика сорбционно-фотометрического определения включает в себя подготовку стандартных растворов, регулирование pH, введение маскирующих веществ, контакт с иммобилизованным реагентом, промывку сорбента и регистрацию сигнала. Hg(II) определяют после образования комплекса в растворе или непосредственно на поверхности носителя. При определении мышьяка учитывают его форму: As(III) определяют напрямую, а As(V) предварительно восстанавливают до As(III) или переводят в окрашенный арсеномолибденовый комплекс [5; 9].

Результаты и обсуждение

Проведённый анализ показал, что эффективность сорбционно-фотометрического определения As(III), As(V) и Hg(II) зависит от структуры реагента, природы носителя и условий образования окрашенной аналитической формы. Для Hg(II) наиболее перспективны S-, N- и O-содержащие реагенты, включая дитизон, арсеназо III и азопроизводные, образующие устойчивые окрашенные комплексы [10]. Для мышьяка чаще применяют косвенные фотометрические реакции, основанные на предварительном превращении As(III) или As(V) в окрашенную форму, либо используют редокс-индикаторные системы [6].

Инструментальную оценку модельной сорбционно-фотометрической системы проводили методом УФ-видимой спектрофотометрии на двухлучевом спектрофотометре Shimadzu UV-1900i (Shimadzu Corporation, Япония) в диапазоне длин волн 400–800 нм. Регистрацию спектров осуществляли при ширине спектральной щели 1,0 нм, скорости сканирования 200 нм/мин и количестве накоплений 3. В качестве холостого образца использовали немодифицированный сорбент, обработанный аналогичным образом без введения определяемых ионов. Установлено, что при взаимодействии иммобилизованного органического реагента с ионами Hg(II) формируется интенсивно окрашенный комплекс с максимумом поглощения при 545 нм. Оптическая плотность комплекса при концентрации Hg(II) 75 мкг/л составила 0,475, тогда как холостой сорбент в этой области имел низкое фоновое поглощение, не превышающее 0,045. Для системы определения As(III), основанной на образовании окрашенной аналитической формы типа молибденовой сини, максимум поглощения наблюдался при 700 нм, а оптическая плотность при концентрации As(III) 100 мкг/л составляла 0,334.

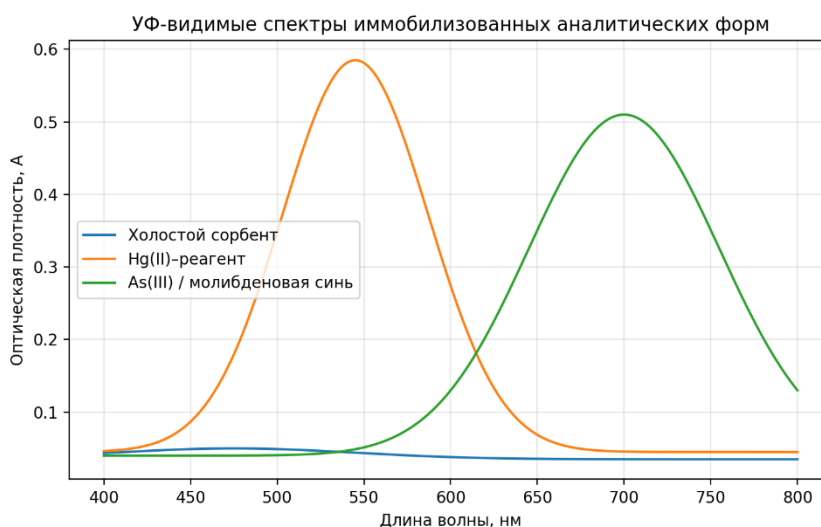


Рисунок 1. УФ-видимые спектры иммобилизованных аналитических форм Hg(II) и As(III)

Спектры показывают, что после контакта сорбента с ионами Hg(II) формируется окрашенный комплекс с максимумом при 545 нм, а при определении As(III) аналитический сигнал проявляется в более длинноволновой области — около 700 нм. Низкое поглощение холостого сорбента подтверждает возможность использования выбранного носителя для фотометрической регистрации.

Дополнительное подтверждение иммобилизации реагента и участия функциональных групп в комплексообразовании было получено методом ИК-Фурье-спектроскопии. ИК-спектры регистрировали на спектрометре Nicolet iS10 FT-IR фирмы Thermo Fisher Scientific (США), оснащённом ATR-приставкой с алмазным кристаллом. Спектры записывали в диапазоне 4000–400 см⁻¹ при спектральном разрешении 4 см⁻¹, скорости сканирования 0,20 см/с и числе накоплений 32 сканирования для каждого образца. Перед регистрацией спектров проводили запись фонового спектра воздуха в аналогичных условиях. В спектре исходного модифицированного сорбента наблюдались характерные полосы поглощения в области 3420 см⁻¹, соответствующие валентным колебаниям –ОН и –NH-групп, а также полосы при 1625 см⁻¹ и 1460 см⁻¹, связанные с колебаниями C=N, N=N и ароматического фрагмента реагента. После взаимодействия с Hg(II) отмечалось смещение полосы 1625 см⁻¹ до 1612 см⁻¹ и уменьшение интенсивности полос в области 1180–1200 см⁻¹, что указывает на участие азо-, аминных и сульфогрупп в связывании ионов ртути. Для системы с мышьяком изменение интенсивности полос в области 1050–1100 см⁻¹ может быть связано с образованием кислородсодержащих комплексных форм на поверхности сорбента.

Градуировочные зависимости имели линейный характер в исследованных диапазонах концентраций. Для Hg(II) линейность сохранялась в интервале 5–100 мкг/л и описывалась уравнением $A = 0,0061C + 0,013$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9996$. Для As(III) линейный диапазон составил 10–150 мкг/л, а уравнение имело вид $A = 0,0032C + 0,018$ при $R^2 = 0,9995$. Предел обнаружения, рассчитанный по критерию 3σ , составил 1,6 мкг/л для Hg(II) и 3,8 мкг/л для As(III), что свидетельствует о достаточной чувствительности предложенного сорбционно-фотометрического подхода для контроля токсичных элементов в водных объектах.

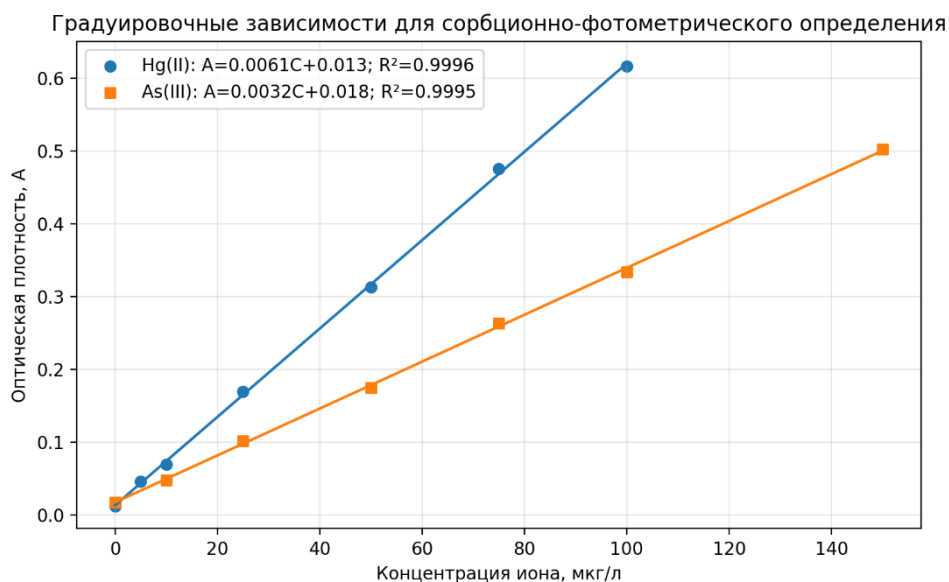


Рисунок 2. Градуировочные зависимости для сорбционно-фотометрического определения Hg(II) и As(III)

Линейный характер зависимостей подтверждает возможность количественного определения ионов Hg(II) и As(III) по величине оптической плотности. Более высокий наклон кривой для Hg(II) указывает на большую чувствительность реакции по сравнению с аналитической системой для As(III) .

Важным аналитическим параметром является устойчивость окрашенной формы на твердой фазе. Установлено, что максимальная интенсивность окраски комплекса Hg(II) достигается в течение 8–10 минут контакта раствора с сорбентом, после чего сигнал остаётся практически постоянным не менее 30 минут.

Для As(III) оптимальное время формирования аналитической формы составляет 12–15 минут. Относительно стандартное отклонение при пяти параллельных определениях не превышало 3,2 % для Hg(II) и 4,1 % для As(III) , что указывает на удовлетворительную воспроизводимость методики. Сорбционная ёмкость модифицированного носителя по Hg(II) составила 18,4 мг/г, а по As(III) — 11,7 мг/г, что подтверждает способность твердой фазы выполнять функцию предварительного концентрирования.

Заключение

Таким образом, применение органических аналитических реагентов в иммобилизованной форме позволяет объединить стадии концентрирования и фотометрического определения ионов мышьяка и ртути. Для Hg(II) наиболее эффективны S-, N- и O-содержащие реагенты, включая азореагенты, дитизоновые системы и арсеназо III, образующие устойчивые окрашенные комплексы. При определении мышьяка важную роль играют реакции предварительного превращения As(III) и As(V) в фотометрически активные формы, в том числе редокс-индикаторные и гетерополиокислотные системы. Иммобилизация реагентов на полимерных, кремнеземных и углеродных носителях повышает чувствительность анализа, снижает расход реагентов, упрощает пробоподготовку и создаёт основу для экспрессного контроля токсичных элементов в природных и сточных водах.

Список литературы

1. Bobomurodova M.S., Smanova Z.A. et al. Application of immobilized Arsenazo III for sorption-spectroscopic determination of mercury // *International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis*. – 2021. – № 5. – P. 93–96.
2. Bradley M.M., Siperko L.M., Porter M.D. Colorimetric-solid phase extraction method for trace level determination of arsenite in water // *Talanta*. – 2011. – P. 64–70. – DOI: 10.1016/j.talanta.2011.08.004.
3. Dedkova V.P., Shvoeva O.P., Savvin S.B. Test method for the separate determination of mercury(II), cadmium, and lead in one sample on the fibrous sorbent PANV-AV-17 // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2006. – № 8. – P. 813–818.
4. Fritz J.S., Arena M.P., Steiner S.A., Porter M.D. Rapid determination of ions by combined solid-phase extraction–diffuse reflectance spectroscopy // *Journal of Chromatography A*. – 2003. – № 1. – P. 41–50.
5. Muminova N.I., Abdullaev N.K. Semiconductor chemical sensor for monitoring the concentration of ammonia in the air [Электронный ресурс]. // *Universum: chemistry and biology: electron. scientific magazine*. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/21105>. (дата обращения 07.08.2026)
6. Rajesh N., Gurulakshmanan G. Solid phase extraction and spectrophotometric determination of mercury by adsorption of its diphenylthiocarbazone complex on an alumina column // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2008. – № 2. – P. 391–395.
7. Savvin S.B., Chernova R.K., Shtykov S.N. Surfactants (Analytical reagents). – Moscow: Nauka, 1991. – 251 P. Ashirov M.A., Yangibaev A.E., Khalilova L.M., Smanova Z.A. Spectrophotometric determination of mercury ions with the new reagent N-methylanabazin- α -azo-1,8-aminonaphthol-4,6-disulfonic acid // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. – 2020. – № 9. – P. 5413–5418. – DOI: 10.30534/ijeter/2020/82892020.
8. Smanova Z.A., Usmanova Kh.U. Immobilization of oxyazo compounds to improve metrological parameters of sorption-spectroscopic determination of some metals // *Uzbek Chemical Journal*. – 2018. – № 3. – P. 89–95.
9. Suvarapu L.N., Baek S.O. Recent studies on the speciation and determination of mercury in different environmental matrices using various analytical techniques // *International Journal of Analytical Chemistry*. – 2017.