

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ: СОВРЕМЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Норматова Н.

Аннотация: Рассмотрены современные подходы к количественному определению урана в природных водах и геологических образцах с учётом особенностей химических форм элемента, матричных эффектов и требований к достоверности аналитических результатов. Сопоставлены масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, оптические, люминесцентные, радиометрические и сорбционно-спектрофотометрические методы. Особое внимание уделено пробоотбору, подготовке минеральных матриц, сорбционному концентрированию уранил-иона UO_2^{2+} , использованию иммобилизованных органических реагентов и метрологической оценке результатов. Предложена схема рационального выбора аналитической методики для различных объектов и концентрационных диапазонов. Обзор основан на опубликованных исследованиях и нормативных методических документах; новые экспериментальные результаты в статье не заявляются.

Ключевые слова: уран, уранил-ион, природные воды, геологические образцы, ICP-MS, спектрофотометрия, сорбционное концентрирование, иммобилизованные реагенты, аналитическая химия.

Введение

Мониторинг содержания урана актуален для оценки состояния подземных и поверхностных вод, геохимических исследований,

контроля горнодобывающих территорий и обращения с минеральным сырьём. Уран относится к природным радиоактивным элементам, поэтому при оценке его содержания следует разграничивать химическую концентрацию и радиологические характеристики. Массовая концентрация общего урана не эквивалентна активности отдельных изотопов; выбор показателя определяется задачей исследования [1, 2].

Результат анализа зависит не только от чувствительности детектора, но и от сохранения исходных форм аналита при отборе и подготовке проб. В поверхностных и подземных водах на распределение урана существенное влияние оказывают окислительно-восстановительные условия, pH, карбонатная система и присутствие кальция и органического вещества. В геологических материалах дополнительно важны минералогическая неоднородность и полнота разложения образца. Цель данной статьи — систематизировать аналитические подходы, определить их преимущества и ограничения и обосновать перспективность сорбционно-спектрофотометрических систем.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено как критический обзор нормативных и научных публикаций по определению урана в водных и твёрдых природных объектах. Сравнение основано на принципе измерения, пригодности к анализу сложных матриц, возможностях концентрирования, контроле помех и требованиях к метрологической валидации. В качестве опорных документов использованы ISO 17294-2:2023 [1], метод EPA 200.8 [2], справочные аналитические сведения ATSDR [3] и специализированные публикации по

спектрофотометрии [4, 5]. Конкретные числовые пределы обнаружения не представлены как универсальные: они зависят от используемого прибора, методики и матрицы.

Результаты обзора и обсуждение

1. Химические формы урана и их аналитическое значение

В природных окислительных водных средах уран(VI) часто представлен уранильной группой UO_2^{2+} и её гидроксо- и карбонатными комплексами. При повышении карбонатности возрастает роль анионных уранил-карбонатных частиц; в присутствии кальция могут формироваться смешанные кальций-уранил-карбонатные комплексы. В восстановительных условиях U(IV) может переходить в слаборастворимые фазы. Поэтому эффективность сорбции и комплексообразования невозможно оценивать без фиксации кислотности, окислительно-восстановительных условий и состава раствора [5, 6].

Для фотометрического определения наиболее распространён подход с формированием окрашенного комплекса U(VI) с органическим реагентом. При разработке новой методики следует различать реакционную способность свободного уранил-иона и суммарную концентрацию растворённых форм урана. Введение маскирующих веществ или изменение pH способно изменять не только селективность, но и химическую форму аналита.

2. Отбор и подготовка водных проб

При исследовании природных вод требуется заранее определить измеряемую величину: растворённый уран (после фильтрования по принятой методике) или общий извлекаемый уран (с учётом взвешенных компонентов). Пробы собирают в химически

совместимые чистые ёмкости; способ консервации выбирают в соответствии с валидированной аналитической процедурой. Для ICP-MS распространена кислотная консервация, но её нельзя механически переносить на исследования исходного распределения химических форм урана [1, 2].

Высокая минерализация, растворённое органическое вещество, железо, кальций, фосфаты и карбонаты могут влиять на извлечение, фон или аналитический отклик. Применяют холостые пробы, контроль внесённой добавки, разбавление, внутренние стандарты, сорбционную очистку и, при необходимости, метод стандартных добавок. Отсутствие загрязнения на стадии отбора имеет такое же значение, как параметры прибора.

3. Подготовка геологических образцов

Геологические материалы отличаются неоднородностью и содержанием трудноразлагаемых силикатов, фосфатов и оксидных минералов. После репрезентативного отбора обычно выполняют высушивание, измельчение, гомогенизацию и выделение аналитической навески. Для определения общего урана используют проверенные способы кислотного разложения или сплавления, причём полнота вскрытия матрицы должна быть подтверждена анализом стандартных образцов соответствующего состава. Некоторые кислоты и реагенты требуют специального оснащения и строгого соблюдения регламентов химической и радиационной безопасности [3, 6].

Пробоподготовка способна определять суммарную систематическую погрешность: неполное вскрытие урансодержащих минералов даёт заниженный результат, а постороннее внесение

аналита и потери при переносе — ошибку противоположного направления. Для геологических проб рекомендуется отдельно указывать массовую долю урана в сухом веществе и параметры пересчёта из раствора после разложения.

4. Инструментальные методы определения

ICP-MS — один из основных методов многоэлементного следового анализа вод. Стандарт ISO 17294-2:2023 охватывает определение урана и его изотопов в различных типах вод; EPA 200.8 регламентирует определение следовых элементов в воде и отходах методом ICP-MS [1, 2]. Преимуществами служат высокая чувствительность, широкий динамический диапазон и возможность одновременной регистрации ряда элементов. Ограничения включают стоимость оборудования, матричные эффекты, необходимость калибровки и контроля возможных спектральных интерференций.

Атомно-эмиссионная спектрометрия ICP-OES пригодна прежде всего для образцов с концентрациями, соответствующими её рабочему диапазону, тогда как при следовых количествах урана ICP-MS обычно предпочтительнее. Радиометрические методы (в частности, альфа-спектрометрия) необходимы, когда задачей является активность и изотопный состав, а не только массовая концентрация. Люминесцентные способы используют особенности свечения уранильных комплексов и могут обладать высокой чувствительностью, но зависят от состава среды и тушения сигнала [3, 5].

5. Спектрофотометрическое и сорбционно-спектрофотометрическое определение

Спектрофотометрические методики основаны на изменении поглощения света при образовании комплекса U(VI) с хромогенным реагентом. Один из известных реагентов — Арсеназо III. Публикация Jauberty и соавт. демонстрирует адаптацию данного подхода к анализу водных и растительных образцов и подчёркивает важность стабилизации комплекса в некоторых матрицах [4]. Вместе с тем реактив содержит мышьякорганические фрагменты, что усиливает требования к обращению с отходами.

Предварительное сорбционное концентрирование повышает отношение аналитического сигнала к фону и позволяет частично отделить уран от сопутствующих компонентов. Возможны сорбция уранильных комплексов на функционализированной поверхности, связывание урана иммобилизованным лигандом или сорбция с последующей элюцией и измерением в растворе. Эти варианты различаются механизмом и не должны объединяться без указания способа регистрации. Прямое измерение окрашенной твёрдой фазы при помощи диффузного отражения или измерения оптической плотности материала уменьшает число операций элюирования и потенциально подходит для экспресс-анализа [5].

7. Обеспечение качества результатов

Для любой выбранной методики необходимо оценить селективность, линейность и рабочий диапазон, предел обнаружения LOD, предел количественного определения LOQ, повторяемость, промежуточную прецизионность и правильность. Ориентировочные выражения $LOD = 3s_0/b$ и $LOQ = 10s_0/b$ применимы при выполнении принятых предпосылок, где s_0 — стандартное отклонение сигнала холостой пробы, b — наклон градуировочной зависимости. Эти

формулы не заменяют полноценной оценки согласно принятому руководству валидации.

Рекомендуется проводить анализ контрольных образцов, матричных добавок и дублирующих проб, а при наличии возможностей — сравнение с независимым методом, например ICP-MS. В твёрдофазных системах дополнительному контролю подлежат партии сорбента, эффективность иммобилизации, кинетика установления равновесия и стабильность аналитического сигнала при хранении. Отдельный этап — оценка неопределённости с учётом пробоподготовки, калибровки и межсерийной вариации.

8. Перспективные направления исследований

Наиболее перспективным направлением представляется создание селективных твердофазно-оптических систем на основе функционализированных носителей и иммобилизованных органических лигандов, способных распознавать уранил на фоне карбонатных, кальциевых и железосодержащих компонентов. В качестве научной задачи целесообразно сопоставлять физическую адсорбцию реагента и его ковалентное закрепление, устанавливать состав поверхностных комплексов и исследовать зависимость аналитического отклика от химических форм урана. Качество новой методики должно подтверждаться не только высокой интенсивностью окраски, но и воспроизводимым определением в модельных и реальных матрицах [4, 5].

Заключение

Проведённый анализ показывает, что универсального метода определения урана для всех природных вод и геологических образцов не существует. Для многоэлементного следового анализа вод

наиболее информативна ICP-MS при надлежащем контроле интерференций; при определении изотопной активности необходимы соответствующие радиометрические методы. Оптические методики остаются востребованными благодаря доступности, особенно при сочетании с предварительным сорбционным концентрированием. Их дальнейшее развитие связано с функционализированными сорбентами, химически устойчивыми иммобилизованными реагентами и прямой регистрацией сигнала твёрдой фазы. Для геологических проб определяющим фактором достоверности остаётся полнота вскрытия матрицы, а для вод — сохранение выбранной аналитической формы и контроль помех. Любая новая методика должна быть подтверждена сопоставлением с независимыми методами, стандартными образцами и полной метрологической оценкой.

Список литературы

1. ISO 17294-2:2023. Water quality — Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes. ISO, 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/82245.html>
2. U.S. Environmental Protection Agency. Method 200.8: Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry. Revision 5.4, 1994. URL: <https://www.epa.gov/cwa-methods/approved-cwa-test-methods-metals>
3. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Uranium. Analytical Methods for Determining Uranium in Environmental Samples. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158797/table/T32/>

4. Jauberty L., Drogat N., Decossas J.-L., Delpech V., Gloaguen V., Sol V. Optimization of the arsenazo-III method for the determination of uranium in water and plant samples // Talanta. 2013. Vol. 115. P. 751–754. DOI: 10.1016/j.talanta.2013.06.046.

5. A review of uranium (U) elemental detection methods // Analytical Methods. 2025. DOI: 10.1039/D4AY02115K. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ay/d4ay02115k>

6. International Atomic Energy Agency. Analytical Methods / ALMERA validated methods. URL: <https://analytical-reference-materials.iaea.org/analytical-methods-2>

Сведения об авторе: Норматова Н. (учёная степень, место работы, город, ORCID, e-mail — заполнить перед подачей).