



Абрамов Е.Г., Кирьякова Н.А., Жернов Ю.В.

Комплексное ионохроматографическое определение нормируемых компонентов в воде с использованием кондуктометрии и амперометрии

ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью»
Федерального медико-биологического агентства, 119121, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Важнейшая задача мониторинга объектов окружающей среды — контроль физиологически значимых минеральных компонентов в питьевой воде. При ионохроматографическом анализе смесь анионов в водной пробе можно разделить на микро- и макрокомпоненты. Хроматографическое определение таких токсикологически значимых микрокомпонентов, как нитриты, бромиды, йодиды, затруднено или невозможно при значительном избытке макрокомпонентов: хлоридов, нитратов, сульфатов. Одновременное последовательное использование кондуктометрии и амперометрии позволяет эффективно решать эту сложную аналитическую задачу и получать хроматографические результаты при анализе многокомпонентной пробы в одном файле.

Материалы и методы. Исследования выполнены с использованием хроматографической системы «Стайер» с анионными колонками ICsepAN2 (США), «Аквион А1» (Российская Федерация), катионной колонкой Shodex IC YS-50 150/4,6 (Япония) и амперометрическим и кондуктометрическим детекторами. В исследованиях использовано стандартное и эксклюзивное капиллярное подавление фона. Объектами исследований были водные образцы (натурные и модельные) с разным соотношением концентраций по определяемым ионам.

Результаты. Разработан новый вариант использования ионохроматографического метода для аналитического контроля ионов в пробах воды с различными соотношениями концентраций микро- и макрокомпонентов. Последовательное применение кондуктометрии и амперометрии в сочетании с эксклюзивным капиллярным подавлением фона позволило эффективно определять такие нормируемые анионы, как нитриты, бромиды и йодиды, при тысячекратных избытках хлоридов, нитратов и сульфатов. В одном файле при двухканальной регистрации кондуктометрических и амперометрических сигналов показана возможность получения единой хроматографической картины при разовом вводе аликвоты в хроматографическую систему. Метод был опробован для контроля нормируемых компонентов в различных водных объектах: водопроводной, сточной, минеральной воде.

Ограничения исследования. При одновременном присутствии в пробах значительных количеств нитритов и бромидов (более 5 мг/дм³) их хроматографическое разделение затруднено из-за близких времён удерживания. Однако такие пробы не встречались авторам на практике при проведении исследований с целью мониторинга водных объектов окружающей среды.

Заключение. Разработан новый вариант использования ионной хроматографии (ИХ) как метода контроля анионного (катионного) состава воды, включающий последовательное кондуктометрическое и амперометрическое детектирование по мере прохождения элюента через хроматографическую систему. Способ позволяет определять микроконцентрации токсичных компонентов (нитритов, бромидов, йодидов, сульфитов) на фоне тысячекратных избытков макрокомпонентов. При этом двухканальная фиксация хроматографических сигналов позволяет получать полную хроматографическую картину как по микро-, так и по макрокомпонентам пробы.

Ключевые слова: хроматография; кондуктометрия; амперометрия; анионный анализ; катионный анализ; микрокомпоненты; макрокомпоненты

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует предоставления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Абрамов Е.Г., Кирьякова Н.А., Жернов Ю.В. Комплексное ионохроматографическое определение нормируемых компонентов в воде с использованием кондуктометрии и амперометрии. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(11): 1520–1525. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1520-1525> <https://elibrary.ru/jifnzb>

Для корреспонденции: Абрамов Евгений Геннадиевич, e-mail: E.Abramov@cspmz.ru

Участие авторов: Абрамов Е.Г. — сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста, концепция исследования, редактирование; Кирьякова Н.А. — сбор и обработка материала, статистическая обработка, редактирование текста; Жернов Ю.В. — редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 19.03.2025/ Поступила после доработки: 22.07.2025 / Принята к печати: 03.11.2025 / Опубликовано: 19.12.2025

Evgeny G. Abramov, Nadezhda A. Kiryakova, Yury V. Zhernov

Complex ionochromatographic determination of normalized components in water using conductometry and amperometry

Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The most important task of monitoring environmental objects is the control of physiologically significant mineral components in drinking water. In ionochromatographic analysis of a mixture of anions in an aqueous sample, they can be divided into micro- and macro-components. Chromatographic determination of such toxicologically significant micro-components as nitrites, bromides, and iodides is difficult or impossible with large excesses of macro-components: chlorides, nitrates, and sulfates. Simultaneous sequential use of conductometry and amperometry makes it possible to effectively solve this complex analytical problem and obtain chromatographic results when analyzing a multicomponent sample in a single file.

Materials and methods. The studies were performed using the «Steyer» chromatographic system with ICsepAN2 (USA) and Aquilon A1 (RF) anion columns and amperometric and conductometric detection. Standard and exclusive capillary background suppression was used in the research. The objects of research were water samples (full-scale and model) with different concentration ratios for the anions to be determined.

Results. A new option of ionochromatographic method has been developed for the analytical control of anions in water samples with different concentrations of micro- and macro components. Consistent use of conductometry and amperometry combined with capillary exclusive background suppression has made it possible

an effective detection of toxic anions such as nitrites, bromides, and iodides with presence of thousands of times the excess of chlorides, nitrates, and sulfates. At the same time, in a single file with two-channel recording of conductometric and amperometric signals, the possibility of obtaining a single chromatographic picture with a single aliquot input into the chromatographic system is shown.

Limitations. When significant amounts of nitrites and bromides (more than 5 mg/dm) are present in the samples at the same time, their chromatographic separation is difficult due to their similar retention times. However, the authors have not encountered such samples in their research on monitoring water bodies in the environment.

Conclusion. A new use case for ion chromatography (IC) is proposed as a method for monitoring the anionic composition of water, including sequential conductometric and amperometric detection as the eluent passes through the chromatographic system. The method makes it possible to determine the microconcentrations of toxic components (nitrites, bromides, iodides) against the background of a thousand fold excess of macro components. At the same time, two-channel fixation of chromatographic signals allows obtaining a complete chromatographic picture of both micro and macro components of the sample.

Keywords: Chromatography; conductometry; amperometry; anionic analysis; cationic analysis; micro-components; macro-components

Compliance with ethical standards. The conclusion of the biomedical ethics committee or other documents (in Russian and English) is not required.

For citation: Abramov E.G., Kiryakova H.A., Zhernov Yu.V. Complex ionochromatographic determination of normalized components in water using conductometry and amperometry. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(11): 1520–1525. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-11-1520-1525> <https://elibrary.ru/jifnzb> (In Russ.)

For correspondence: Evgeny G. Abramov, e-mail: EAbramov@cspmr.ru

Contribution: Abramov E.G. — collection and processing of material, statistical processing, text writing, research concept, editing; Kiryakova N.A. — collection and processing of material, text correction; Zhernov Yu.V. — editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: March 19, 2025 / Revised: July 22, 2025 / Accepted: November 3, 2025 / Published: December 19, 2025

Введение

Как известно из литературы, в организме человека присутствуют 22 наиболее физиологически значимых элемента, обычно входящих в состав различных неорганических веществ, а именно: Ca, P, O, Na, Mg, S, B, Cl, K, F, I, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cr, Si, Se [1]. Значительная часть этих элементов поступает в организм с питьевой водой [2, 3]. По содержанию в питьевой воде первые 10 элементов можно отнести к макрокомпонентам, их физиологическая роль в процессах обмена хорошо известна. Так, например, недостаток в организме человека Na, Mg, K может нарушать водно-солевой баланс, спровоцировать болезни системы кровообращения, способствовать развитию гипертонии. Микроэлементы Fe, Zn, Cu входят в состав различных ферментов. Например, железо входит в состав 70, а цинк 100 ферментов, присутствующих в организме человека [1]. Таким образом, важнейшей задачей мониторинга объектов окружающей среды является контроль содержания физиологически значимых минеральных компонентов в различных водах: питьевых, поверхностных, скважинных, сточных, минеральных и др. Обычный состав таких вод включает катионы Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} . Анионный состав, как правило, представлен анионами: F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , Br^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , I^- . ПДК катионов имеют следующие значения (мг/дм³): Na^+ — 200; NH_4^+ — 2,5; K^+ — 20; Mg^{2+} — 40; Ca^{2+} не нормируется; Sr^{2+} — 7. ПДК для анионов имеют следующие значения, мг/дм³: F^- — 0,6–1,2; Cl^- — 300; NO_2^- — 3; NO_3^- — 45; Br^- — 0,2; PO_4^{3-} — 3,5; SO_4^{2-} — 500; I^- — 0,01–0,12¹. Необходимо отметить, что для воды рыбоводческих хозяйств ПДК анионов нитрита и фосфата равны 0,08 и 0,5 мг/дм³ соответственно². В бутилированной воде высшей категории концентрация нитрита не должна превышать 0,005 мг/дм³.³

¹ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков.

² Приложение к приказу Минсельхоза России № 552. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. М.; 2016.

³ Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в ёмкости. Контроль качества. СанПиН 2.1.4.1116–02.

Концентрационный диапазон измерений катионного состава различных вод, как правило, укладывается в 1,5–2 порядка, и при использовании ионной хроматографии (ИХ) и катионной колонки (например, Shodex IC YS-50, Япония) аналитическое определение всего спектра нормируемых катионов на одной хроматограмме (одном файле) не представляет затруднений. Для получения исчерпывающей информации о качестве питьевой воды наряду с катионным анализом необходим анализ анионов. Но если по результатам анализа катионов можно судить преимущественно о физиологическом аспекте исследуемой воды, то при анализе анионов на первое место выходит токсикологический фактор, поскольку содержащиеся в питьевой воде нитрит-ионы, бромид-ионы, иодид-ионы относятся уже ко второму классу опасности.

Концентрационные различия анионов в отличие от катионов в пробах воды могут составлять три и более порядка. При использовании ИХ и высокоселективных анионных колонок (Shodex IC S-52 4E, Япония, или IC SepAN2, США) имеет место недостаточно большая разница во временах удерживания ионов для их полного разделения, и анионный анализ смеси микро- и макрокомпонентов является проблематичным, а часто невозможным из-за перекрытия хроматографического пика микрокомпонента пиком макрокомпонента.

В [4–6] авторы предложили эффективный ионохроматографический способ определения микрокомпонентов на фоне тысячekратных избытков макрокомпонентов, а именно токсикологически значимых нитрит- и йодид-ионов на фоне избытков хлоридов, нитратов и сульфатов. Наша работа развивает методические подходы, используемые в [4–6], и показывает возможность комплексного определения микро- и макрокомпонентов в пробе воды при разовом вводе аликвоты в хроматографическую систему с получением результирующих хроматограмм определяемых анионов в одном файле.

Материалы и методы

Работа выполнена на хроматографической системе «Стайер». Использовали два детектора: кондуктометрический и амперометрический. При анионном анализе применяли анионные колонки IC SepAN2 (США), «Аквилон А1» (Российская Федерация). Элюент карбонат-бикарбонатный (250 мг/дм³ Na_2CO_3 + 200 мг/дм³ NaHCO_3), подавление фона капиллярное, скорость элюирования 0,6 мл/мин, объём петли дозатора 250 мкл.

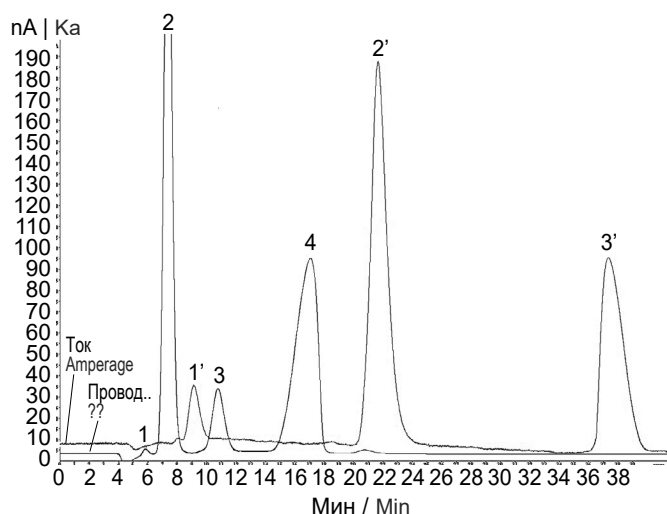


Рис. 1. Кондуктограмма и амперограмма воды, фиксирующие микро- и макрокомпоненты. Разделяющая колонка «Аквион А1» (Российская Федерация). Пики 1, 2, 3, 4 – макрокомпоненты фторид, хлорид, нитрат, сульфат. Концентрация: 0,2; 27; 4; 37 мг/дм³ соответственно, детектирование кондуктометрическое. Пики 1'; 2'; 3' – микрокомпоненты нитрит, йодид, роданид. Концентрация: 0,01; 0,2; 0,1 мг/дм³ соответственно, детектирование амперометрическое.

Fig. 1. Water conductogram and amperogram, fixing micro- and macro components. Dividing column "Aquilon A1" (Russian Federation). Peaks 1, 2, 3, and 4 are the macro components fluoride, chloride, nitrate, and sulfate. Concentration: 0.2; 27; 4; 37 mg/dm³, respectively, the conductometric detection. Peaks 1'; 2'; 3' are micro-components nitrite, iodide, and rhodanide. Concentration: 0.01; 0.2; 0.1 mg/dm³, respectively, amperometric detection.

Принцип метода. После разделяющей колонки элюент, содержащий разделённую смесь анионов, поступает в стандартный капиллярный подавитель фона, в котором находится серная кислота с рекомендованной (паспортной) концентрацией. После подавителя раствор элюента подаётся на кондуктометр, а после выхода из кондуктометра – снова на эксклюзивный капиллярный подавитель, в котором используется серная кислота с концентрацией 5 моль/дм³. После второго (эксклюзивного) капиллярного подавителя элюирующий раствор поступает на амперометрический детектор. При прохождении потока через кондуктометр формируется хроматограмма, фиксирующая макрокомпоненты: фториды, хлориды, нитраты, фосфаты, сульфаты. При прохождении потока через амперометрический детектор формируется хроматограмма, фиксирующая микрокомпоненты: нитриты, бромиды, йодиды, сульфиты, роданиды.

Аналогично анионному анализу организуется прохождение потока элюента при анализе катионов с использованием катионной колонки Shodex IC YS-50 (Япония). В этом случае анализ проводится без подавления фона, а элюирующий раствор после кондуктометра сразу подаётся на амперометрический детектор. Скорость потока 0,6 мл/мин. Элюент – метансульфоновая кислота, $C = 3$ ммоль/дм³. Объём петли дозатора – 50 мкл.

При катионном анализе дополнительное к кондуктометрии амперометрическое детектирование позволяет регистрировать пики некоторых органических соединений, содержащих в молекуле аминокислотные группы. Например, при использовании двухдетекторного анализа можно анализировать водные пробы, содержащие наряду с аммонием и катионами 1-й и 2-й групп парацетамол.

В качестве матрицы для анализируемых растворов использовалась водопроводная вода Рублёвской станции водоподготовки, которую отбирали в Москве (ул. Погодинская, д. 10). В воду вносили соответствующие добавки микрокомпонентов. Нитрит в воду не вносили, концентрация в водопроводной воде нитрит-ионов $C = 0,01$ мг/дм³ была изначальной.

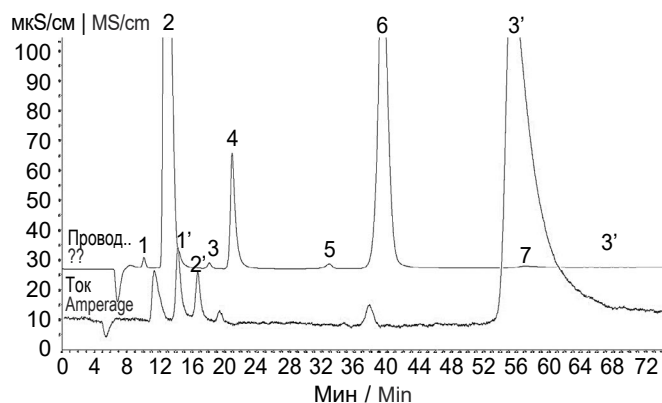


Рис. 2. Кондуктограмма и амперограмма воды, фиксирующие микро- и макрокомпоненты. Разделяющая колонка IC SepAN2 (США). Пики 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7 – фторид, хлорид, бромид, нитрат, фосфат, сульфат, йодид. Концентрация 0,2; 27; 0,15; 4; 1; 37; 0,2 мг/дм³ соответственно, детектирование кондуктометрическое. Пики 1'; 2'; 3' – нитрит, бромид, йодид. Концентрация 0,01; 0,15; 0,2 мг/дм³ соответственно, детектирование амперометрическое.

Fig. 2. Water conductogram and amperogram, fixing micro- and macro components. Dividing column IC SepAN2 (USA). Peaks 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7 – fluoride, chloride, bromide, nitrate, phosphate, sulfate, iodide. Concentration 0.2; 27; 0.15; 4.0; 1; 37; 0.2 mg/dm³, respectively, the conductometric detection. Peaks 1'; 2'; 3' are nitrite, bromide, and iodide. The concentration is 0.01; 0.15; 0.2 mg/dm³, respectively, the detection is amperometric.

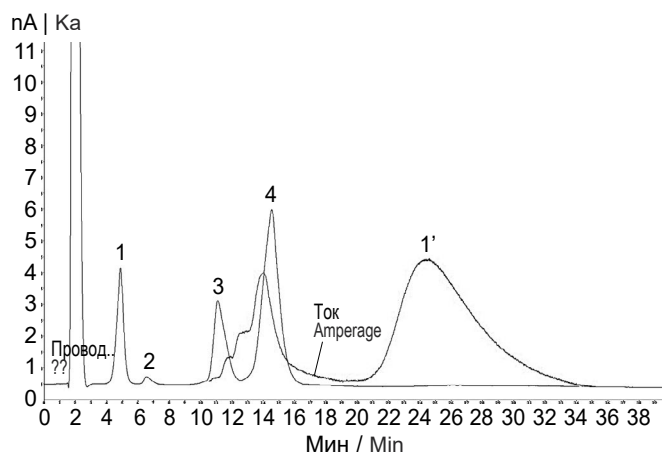


Рис. 3. Кондуктограмма и амперограмма водопроводной воды, фиксирующие присутствующие катионные формы. Разделяющая колонка Shodex IC YS-50. Пики 1, 2, 3, 4 – натрий, калий, магний, кальций. $C = 19$; 3; 14; 65 мг/дм³ соответственно. Пик 1' – N-(4-гидроксифенил)ацетамид (парацетамол). $C = 5$ мг/дм³.

Fig. 3. Tap water conductogram and amperogram, fixing the cationic forms present. Separating column Shodex IC YS-50. Peaks 1, 2, 3, 4 – sodium, potassium, magnesium, calcium. $C = 19$; 3; 14; 65 mg/dm³, respectively. Peak 1' – N-(4-hydroxyphenyl)acetamide (paracetamol). $C = 5$ mg/dm³.

При апробации метода изучены сточные воды очистных станций (Курьяновской, в Южном Бутове, Люберцах, Зеленограде), минеральная вода торговых марок «Ессентуки», «Боржоми», «Нарзан», морская вода нескольких морей.

Результаты

В результате исследований был разработан новый эффективный вариант ионохроматографического метода для аналитического контроля ионов в пробах воды с различными соотношениями концентраций микро- и макрокомпонентов. На рис. 1–3 представлены хроматограммы, иллюстрирующие вышесказанное.

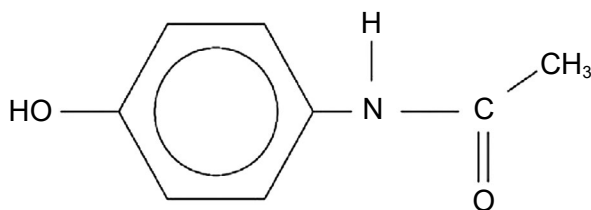


Рис. 4. Молекулярное строение парацетамола (N-(4-гидроксифенил)ацетамида).

Fig. 4. The molecular structure of paracetamol (N-(4-hydroxyphenyl)acetamide).

Рис. 1. демонстрирует возможности метода с использованием российской колонки «Аквилон А1» при анализе водопроводной воды, содержащей микрокомпоненты: нитрит, $C = 0,01 \text{ мг/дм}^3$; йодид, $C = 0,2 \text{ мг/дм}^3$; роданид, $C = 0,1 \text{ мг/дм}^3$. Как видно из хроматограмм, амперометрические сигналы от микрокомпонентов (пики 1'; 2'; 3') по интенсивности сравнимы с кондуктометрическими сигналами макрокомпонентов (пики 3; 4). При этом следует отметить, что амперометрическим детектором макрокомпоненты практически не фиксируются (не мешают определению), поскольку отсутствует анодный разряд анионов (фторидов, хлоридов, нитратов, сульфатов, $U_{\text{анодное}} = +0,95 \text{ вольт}$), а их мешающее влияние из-за флуктуационного роста электропроводности подавляется во втором капиллярном (эксклюзивном) подавителе с 5 моль/дм^3 раствором серной кислоты. Следует отметить особенно удачное определение нитритов (см. рис. 1, пик 1'), при котором амперометрическая фиксация $[\text{NO}_2^-]$ сравнима по интенсивности с кондуктометрическим сигналом $[\text{NO}_3^-]$ (пик 3). Кондуктометрический сигнал нитрита не фиксируется, то есть нитрит при таких низких концентрациях не определяется вовсе при стандартном подходе, а соотношение $[\text{NO}_3^-]/[\text{NO}_2^-] = 400/1$. Избыток же $[\text{Cl}^-]/[\text{NO}_2^-] \sim 3000$, при этом хлорид не фиксируется амперометрически и не влияет на определение нитрита.

Аналогично нитриту проявляют себя другие анодно разряжающиеся анионы, такие как йодид (см. рис. 1, пик 2') и роданид (см. рис. 1, пик 3') (ПДК = $0,1 \text{ мг/дм}^3$). Так, в случае йодида при почти двухсоткратном избытке сульфата интенсивность пика йодида выше почти в два раза. На кондуктограмме пик йодида фактически не выражен, как и нитрита, что создаёт однозначные проблемы при контроле этого компонента стандартным общеизвестным методом с кондуктометром.

Таким образом, применение представленного варианта анализа позволяет контролировать весь необходимый диапазон концентраций нитрита от бутилированной воды высшей категории ($C = 0,005 \text{ мг/дм}^3$) до водопроводной воды (ПДК = 3 мг/дм^3). При этом анализ практически не зависит от влияния хлоридов и нитратов, мешающих определению с использованием стандартной ионной хроматографии с кондуктометрическим окончанием.

Рис. 2 демонстрирует возможности метода при использовании колонки ICSePAN2 (США) для анализа водопроводной воды, содержащей микрокомпоненты: нитрит, $C = 0,01 \text{ мг/дм}^3$; бромид, $C = 0,15 \text{ мг/дм}^3$; йодид, $C = 0,2 \text{ мг/дм}^3$. Все три вещества относятся ко второму классу опасности (ПДК йодида = $0,125 \text{ мг/дм}^3$)¹. Принято считать, что оптимальное содержание йодида в бутилированной воде высшей категории – $0,04\text{--}0,06 \text{ мг/дм}^3$.

Предел обнаружения каждого из веществ (нитрит, бромид, йодид) составляет $0,0005$; $0,05$; $0,0025 \text{ мг/дм}^3$ соответственно. Амперометрическому фиксированию микрокомпонентов не мешают тысячекратные избытки макрокомпонентов, фиксируемые кондуктометрически. Используемые разделяющие колонки «Аквилон А1» и ICSePAN2 значительно отличаются по времени эксплуатации, степени изношенности и, следова-

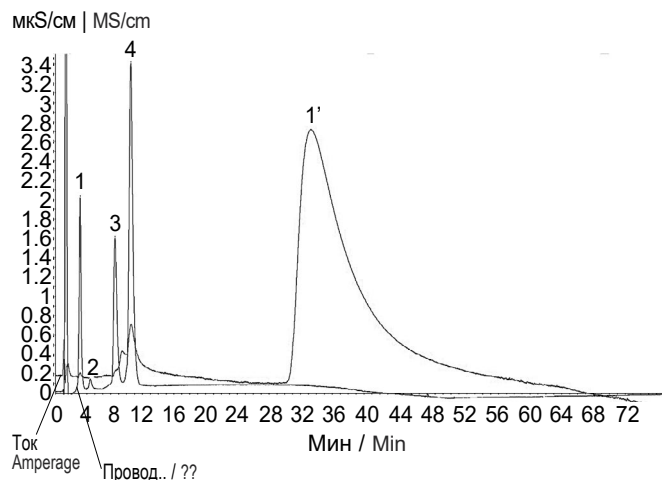


Рис. 5. Кондуктограмма и амперограмма горячей водопроводной воды, фиксирующие присутствующие катионные формы. Разделяющая колонка Shodex IC YS-50. Пики 1, 2, 3, 4 – натрий, калий, магний, кальций. $C = 19$; 3; 14; 65 мг/дм^3 соответственно. Пик 1' – диэтилгидроксиламин ($\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}$), $C = 50 \text{ мг/дм}^3$.

Fig. 5. Tap water conductogram and amperogram, fixing the cationic forms present. Separating column Shodex IC YS-50. Peaks 1, 2, 3, 4 – sodium, potassium, magnesium, calcium. $C = 19$; 3; 14; 65 мг/дм^3 , respectively. Peak 1' – diethylhydroxylamine. $C = 50 \text{ мг/дм}^3$.

тельно, селективности. Колонка «Аквилон А1» используется более 10 лет, колонка ICSePAN2 – менее полугод. Однако представляемый вариант ионохроматографического анализа позволяет достаточно эффективно пользоваться колонками с частично утраченными при длительной эксплуатации селективными свойствами. В отличие от анализа нитрита получение амперометрического сигнала от разряда бромида требует более высокого анодного потенциала $U = +1,45 \text{ вольт}$.

На рис. 3 представлены хроматограммы определения катионов на колонке Shodex IC YS-50 (Япония) в водопроводной воде, в которую добавлен N-(4-гидроксифенил)ацетамид (парацетамол).

В этом случае сочетание кондуктометрии и амперометрии демонстрирует возможность как неорганического катионного анализа, так и органического анализа веществ амина-амидной природы (к которым относятся в том числе катионные ПАВ) при условии, что они по своим химическим свойствам являются органическими катионами-восстановителями (рис. 4), которые могут окисляться анодно (либо за счёт фенильных радикалов, либо при наличии в молекулярном строении ненасыщенных связей):

На рис. 5 представлены хроматограммы горячей водопроводной воды, отобранной в Москве (ул. Погодинская, д. 10/1). На амперограмме зафиксирован пик вещества аминной природы ($C \sim 50 \text{ мг/дм}^3$). Этим веществом является диэтилгидроксиламин ($\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}$) – вещество (поглотитель кислорода), широко используемое котельными для защиты котлов и трубопроводов сетей горячего водоснабжения от коррозии. Масс-спектрометрические исследования с использованием масс-детектора Agilent 6430 LC/MS подтвердили присутствие в пробах воды вещества с молекулярной массой 89 Да. Вещество (техническое название В21) внесено Роспотребнадзором в Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ, регистрационный номер № ВТ-001880.

Обсуждение

Одновременное применение двухдетекторного варианта ионохроматографического анализа открывает возможности информативного экспрессного контроля гигиенически

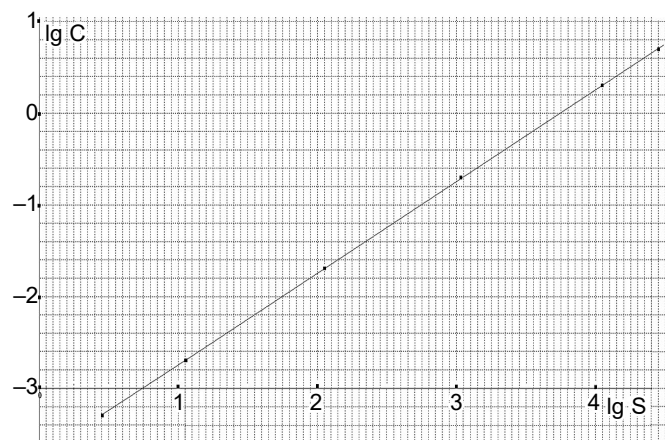


Рис. 6. Логарифмическая зависимость между концентрацией нитрит-ионов в воде и площадью хроматографических пиков при амперометрическом детектировании.

Fig. 6. Logarithmic relationship between the concentration of nitrite ions in water and the area of chromatographic peaks during amperometric detection.

значимых компонентов, содержащихся в различных водах. Комплексный анализ сточной воды четырёх очистных станций (Курьяновской, Южного Бутова, Люберец и Зеленограда) позволил проследить всю цепочку микробиологических превращений от мочевины (аммония) на входе в очистной каскад до нитритов и нитратов при водовыпуске. Было установлено, что микробиологическая очистка сточной воды всех четырёх станций удовлетворительно справляется с трансформацией азотсодержащих веществ (концентрация ионов аммония на входе в очистной каскад, как правило, 40–70 мг/дм³), а содержание нитритов и нитратов в воде водовыпуска не превышает 0,5 и 25 мг/дм³ соответственно. В речной воде реки Москвы содержание нитритов и нитратов также не превышает 0,1 и 4–7 мг/дм³ соответственно. При этом необходимо отметить, что известные из литературы [7–9] методы одновременного определения нитритов и нитратов не могут конкурировать с представленным способом по экспрессности, сходимости, пределу обнаружения, поскольку линейность определения нитрит-ионов этим способом составляет 4 порядка (0,0005–5 мг/дм³). Рис. 6 иллюстрирует вышесказанное.

Анализ сточной воды очистных станций разработанным способом выявил также интересную особенность таких очистных водных систем – присутствие в воде сульфит-ионов (ПДК = 0,2 мг/дм³)¹ в концентрации 10–30 мг/дм³, которая уменьшается по мере продвижения водного потока по очистному каскаду. Концентрация сульфата при этом возрастает. Это в очередной раз свидетельствует о сложных и разнообразных биохимических процессах, протекающих в активном иле станций, контроль которых необходимо проводить современными инструментальными методами анализа.

Большое значение имеет контроль содержания бромид-ионов в воде водоисточников. Сам бромид-ион, относящийся ко 2-му классу опасности, серьёзной угрозы для водопользователей не представляет. Например, в воде торговых марок «Нарзан», «Боржоми», «Ессентуки», широко представленных в торговой сети, содержание ионов бромида, как показали проведённые исследования, составляет 3; 2,6; 0,5 мг/дм³ соответственно. Согласно ТР ЕАЭС 044/2017, допустимое содержание бромида в лечебно-столовой природной минеральной воде равно 25 мг/дм³. Таким образом, относительно высокое содержание ионов бромида в минеральной воде не принимается в расчёт, поскольку токсикологическую опасность представляют гипобромиты

или броматы и броморганические вещества, которые образуются в результате обеззараживания воды на станциях водоподготовки окисляющими хлорсодержащими реагентами (хлором, гипохлоритом натрия) в результате взаимодействия окислённых форм брома (бромата), хлора и гуминовой водной органики [10–12]. Некоторые из таких веществ проявляют гипотоксическое действие и относятся ко 2-му классу опасности, например, бромформ (ПДК = 0,1 мг/дм³), дибромхлорметан (ПДК = 0,03 мг/дм³)¹. Такие же вещества, как бромдихлорметан (ПДК = 0,03 мг/дм³), этилендибромид (ПДК = 0,00005 мг/дм³), 1,2-дибром-3-хлорпропан (ПДК = 0,001 мг/дм³), сам бромат-ион (ПДК = 0,01 мг/дм³), относятся к веществам 1-го класса опасности, которые обладают кумулятивными и канцерогенными свойствами. Кроме того, как известно, элементный бром легко взаимодействует с органическими веществами ароматического ряда, бромлируя бензольное кольцо с образованием бромсодержащих ароматических веществ, а гуминовые кислоты являются веществами, имеющими в своём строении не просто ароматические звенья, а поликонденсированные ароматические циклы [10, 12].

Йодид является эссенциальным веществом [13], его биологически значимая концентрация в йодированной питьевой воде ~ 10–120 мкг/дм³. При йодировании питьевой воды принято считать оптимальной концентрацию 40–60 мкг/дм³. Концентрация свыше 125 мкг/дм³ считается потенциально опасной для здоровья людей. Предел обнаружения йодида разработанным способом – 2,5 мкг/дм³, что делает этот метод уникальным по сравнению с известными [14]. Такая чувствительность сопоставима с практической чувствительностью метода ICP-MS [15, 16]. Однако метод ICP-MS позволяет определять суммарное содержание всех валентных форм йода, в то время как физиологически значимым является только йодид-ион. В практике авторов имел место случай, когда при производстве бутилированной воды в технологической цепочке йодирование производилось перед озонированием. Метод ICP-MS показывал удовлетворительное содержание йода в конечном продукте ~ 50 мкг/дм³. ИХ-метод с амперометрическим детектированием показывал только следовые количества физиологически значимого йодида ≤ 5 мкг/дм³, что в полной мере объясняется окислением йодида озоном до гипойодита и йодата. Нормирующие показатели для этих окислённых форм йода отсутствуют, тем не менее, исходя из общехимических представлений, можно с большой долей вероятности говорить о токсичности образовавшихся веществ, являющихся значительно более сильными окислителями, чем элементный йод.

Заключение

Разработан и опробован на практике вариант ионохроматографического метода контроля гигиенически значимых неорганических веществ, содержащихся в различных водах: водопроводных, поверхностных, сточных, минеральных. В способе используются последовательно два детектора: кондуктометр и амперометрический детектор. Способ является комплексным и позволяет при одном вводе аликвоты в хроматографическую систему получать хроматографическую информацию о содержании в пробе как микроконцентраций гигиенически и токсикологически значимых веществ, так и макроконцентраций физиологически значимых веществ. Чувствительность способа (по пределам обнаружения) уникальна и практически не зависит от содержания макрокомпонентов, наличие которых могло бы помешать хроматографическому определению микроконцентраций таких проблемных в аналитическом плане анионов, как нитриты, бромиды, сульфиты, йодиды, при использовании в качестве метода контроля стандартных вариантов ионной хроматографии или других методов аналитического контроля.

Литература

- Дещина А.Н., Казанцева А.В. Физиологическая полноценность и баланс веществ в организме человека – вводные положения. *Образование и право*. 2019; (6): 148–55. <https://elibrary.ru/ugkrpk>
- Дроздова Е.В., Бурая В.В., Суворец Т.З., Фираго А.В., Гирина В.В. Оценка питьевых вод, потребляемых населением республики Беларусь, по макро- и микроэлементному составу. *Медицина труда и экология человека*. 2017; (1): 44–50. <https://elibrary.ru/zfmfox>
- Якубова И.Ш., Мельцер А.В., Ерастова Н.В., Базилевская Е.М. Гигиеническая оценка обеспечения населения Санкт-Петербурга безопасной, безвредной и физиологически полноценной питьевой водой. *Гигиена и санитария*. 2015; 94(4): 21–5. <https://elibrary.ru/uhkvyr>
- Абрамов Е.Г., Малышева А.Г. Биотрансформация мочевины в воде водных объектов. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(1): 21–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-1-21-29> <https://elibrary.ru/oeuudx>
- Абрамов Е.Г. Ионохроматографический амперометрический анализ как метод контроля малых концентраций веществ в водных объектах. В кн.: *Сысинские чтения – 2021. Материалы II Национального конгресса с международным участием по экологии человека, гигиене и медицине окружающей среды*. М.; 2021: 9–11. <https://elibrary.ru/ghfdnr>
- Абрамов Е.Г., Малышева А.Г. Ионохроматографическое амперометрическое определение йодидов, нитритов и двухвалентного железа в воде. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(11): 1288–93. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1288-1293> <https://elibrary.ru/wkruji>
- Юсенко Е.В., Полинцева Е.А. Определение нитрит- и нитрат-ионов в моче методом ионной хроматографии со спектрофотометрическим детектированием. *Фундаментальные исследования*. 2013; (6–2): 332–6. <https://elibrary.ru/pzqgmf>
- Каминская О.В., Захарова Э.А., Слеченко Г.Б. Совместное вольтамперометрическое определение нитритов и нитратов в водах. *Журнал аналитической химии*. 2004; 59(11): 1206–12. <https://elibrary.ru/oqdut>
- Дикунец М.А., Шпигун О.А., Элефтьеров А.И. Каталитическое детектирование нитрит-иона в ионной хроматографии. *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия*. 2001; 42(6): 414–7. <https://elibrary.ru/bfuaml>
- Малышева А.Г., Абрамов Е.Г., Беззубов А.А. Проблемы контроля бром-содержащих веществ в питьевой воде. *Гигиена и санитария*. 2009; 88(3): 33–6. <https://elibrary.ru/kvktvn>
- Richardson S.D., Thruston A.D., Caughran T.V., Chen P.N., Collette T.M., Schenck K.M., et al. Identification of new drinking water disinfection by-products from ozone, chlorine dioxide, chloramines, and chlorine. *Water Air Soil Pollut.* 2000; 123(1–4): 95–102. <https://elibrary.ru/aghlrx>
- Гончарук В.В., Потапченко Н.Г., Вакуленко В.Ф. Озонирование как метод подготовки питьевой воды: возможные побочные продукты и токсикологическая оценка. *Химия и технология воды*. 1995; 17(1): 3–33. <https://elibrary.ru/kxfjv>
- Трошина Е.А., Платонова Н.М., Панфилова Е.А., Панфилов К.О. Аналитический обзор результатов мониторинга основных эпидемиологических характеристик йододефицитных заболеваний у населения Российской Федерации за период 2009–2015 гг. *Проблемы эндокринологии*. 2018; 64(1): 21–37. <https://doi.org/10.14341/probl201864121-37> <https://elibrary.ru/yvfvzv>
- Колотилина Н.К., Долгонос А.М. Определение йодид-иона в минерализованной природной воде методом изократической ионной хроматографии с кондуктометрическим детектированием. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009; 9(5): 610–5. <https://elibrary.ru/kxfjv>
- Astolfi M.L., Marconi E., Protano C., Vitali M., Schiavi E., Mastromarino P., et al. Optimization and validation of a fast digestion method for the determination of major and trace elements in breast milk by ICP-MS. *Anal. Chim. Acta*. 2018; 1040: 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.07.037>
- Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Maksin V.I., Surovtsev I.V., Mank V.V. Determination of trace amounts of iodide-ions in water using pulse inverse chronopotentiometry. *J. Water Chem. Technol.* 2017; 39(5): 289–93.

References

- Detsina A.N., Kazantseva A.V. Physiological fullness and balance of substances in the human body-introductory provisions. *Obrazovanie i pravo*. 2019; (6): 148–55. <https://elibrary.ru/ugkrpk> (in Russian)
- Drozдова A.V., Buraya V.V., Suravetz T.Z., Firago A.V., Girina V.V. Assessment of drinking water, consumed by the population Belarus, at macro- and microelement staff. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2017; (1): 44–50. <https://elibrary.ru/zfmfox> (in Russian)
- Yakubova I.Sh., Mel'tser A.V., Erastova N.V., Bazilevskaya E.M. Hygienic evaluation of the delivery of physiologically wholesome drinking water to the population of St. Petersburg. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2015; 94(4): 21–5. <https://elibrary.ru/uhkvyr> (in Russian)
- Abramov E.G., Malysheva A.G. Biotransformation of urea in the water of water bodies. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(1): 21–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-1-21-29> <https://elibrary.ru/oeuudx> (in Russian)
- Abramov E.G. Ionochromatographic amperometric analysis as a method for monitoring small concentration of substances in water objects. In: *Sysin readings – 2021. Proceedings of the 2nd National Congress with International Participation on Human Ecology, Hygiene and Environmental Medicine [Sysin'skie chteniya – 2021. Materialy II Natsional'nogo kongressa s mezhdunarodnym uchastiem po ekologii cheloveka, gigiene i meditsine okruzhayushchei sredy]*. Moscow; 2021: 9–11. <https://elibrary.ru/ghfdnr> (in Russian)
- Abramov E.G., Malysheva A.G. Ionic chromatographic determination of iodides, nitrites and bivalent iron in water with amperometric detector. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(11): 1288–93. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1288-1293> <https://elibrary.ru/wkruji> (in Russian)
- Yusenkov E.V., Polyntseva E.A. Determination of nitrite and nitrate ions in urine by ion chromatography. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013; (6–2): 332–6. <https://elibrary.ru/pzqgmf> (in Russian)
- Kaminskaya O.V., Zakharova E.A., Slepchenko G.B. Simultaneous voltammetric determination of nitrites and nitrates in waters. *J. Anal. Chem.* 2004; 59(11): 1206–12. <https://doi.org/10.1023/B:JANC.0000047013.71862.c4> <https://elibrary.ru/lihnnd>
- Dikunets M.A., Shpigun O.A., Elefterov A.I. Catalytic detection of nitrite ion in ion chromatography. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya*. 2001; 42(6): 414–7. <https://elibrary.ru/bfuaml> (in Russian)
- Malysheva A.G., Abramov Ye.G., Bezzubov A.A. Problems in the monitoring of bromine-containing substances in the drinking water. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2009; 88(3): 33–6. <https://elibrary.ru/kvktvn> (in Russian)
- Richardson S.D., Thruston A.D., Caughran T.V., Chen P.N., Collette T.M., Schenck K.M., et al. Identification of new drinking water disinfection by-products from ozone, chlorine dioxide, chloramines, and chlorine. *Water Air Soil Pollut.* 2000; 123(1–4): 95–102. <https://elibrary.ru/aghlrx>
- Goncharuk V.V., Potapchenko N.G., Vakulenko V.F. Ozonation as a method of drinking water treatment: possible by-products and toxicological assessment. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1995; 17(1): 3–33. (in Russian)
- Troshina E.A., Platonova N.M., Panfilova E.A., Panfilov K.O. The analytical review of monitoring of the basic epidemiological characteristics of iodine deficiency disorders among the population of the Russian Federation for the period 2009–2015. *Problemy endokrinologii*. 2018; 64(1): 21–37. <https://doi.org/10.14341/probl201864121-37> <https://elibrary.ru/yvfvzv> (in Russian)
- Kolotilina N.K., Dolgonosov A.M. Determination of iodide in natural mineralized water by isocratic ion chromatography with conductivity detection. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2009; 9(5): 610–5. <https://elibrary.ru/kxfjv> (in Russian)
- Astolfi M.L., Marconi E., Protano C., Vitali M., Schiavi E., Mastromarino P., et al. Optimization and validation of a fast digestion method for the determination of major and trace elements in breast milk by ICP-MS. *Anal. Chim. Acta*. 2018; 1040: 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.07.037>
- Kopilevich V.A., Surovtsev I.V., Galimova V.M., Maksin V.I., Surovtsev I.V., Mank V.V. Determination of trace amounts of iodide-ions in water using pulse inverse chronopotentiometry. *J. Water Chem. Technol.* 2017; 39(5): 289–93.

Сведения об авторах

Абрамов Евгений Геннадиевич, науч. сотр. «ФГБУ ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: EABramov@cspmz.ru

Кирьякова Надежда Александровна, специалист «ФГБУ ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия

Жернов Юрий Владимирович, доктор мед. наук, доцент, директор НИИ ЭЧиГОС им. А.Н. Сынина ФГБУ «ЦСП» ФМБА России, 119121, Москва, Россия. E-mail: YZhernov@cspfmfa.ru

Information about the authors

Evgeny G. Abramov, researcher of Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9611-8430> E-mail: EABramov@cspmz.ru

Nadezhda A. Kiryakova, specialist, Centre for Strategic Planning of the Federal medical biological agency of Russia, Moscow, 119121, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0007-4193-9793>

Yury V. Zhernov, DSc (Medicine), Director, A.N. Sysin Research Institute of Human Ecology and Environmental Hygiene, Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks of the Federal medical and biological agency, Moscow, 119435, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8734-5527> E-mail: YZhernov@cspfmfa.ru