

Химический состав питьевых вод Мурманска и Колы, формы миграции элементов в водах и организме человека, сравнение с водами Кировска

С.И. Мазухина¹, С.В. Дрогобужская¹, В.А. Маслобоев¹, А.А. Широкая¹, Н.В. Ионов¹, Ю.Н. Закревский^{2,3}

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия;

² Мурманский Арктический университет, Мурманск, Россия;

³ Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Представленная работа является логическим продолжением изучения химического состава питьевых вод в разных регионах Мурманской области, оценке их влияния на здоровье человека. Актуальность подобных исследований вызвана превышением среднероссийских показателей заболеваемости в ряде городов и районов Мурманской области. Использование моделирования позволяет осуществлять новые подходы к рассмотрению вопросов возможных форм миграций химических элементов в природных водах и формирования новообразованных фаз в зависимости от различных параметров (химического состава воды, pH, Eh, температуры, условий её формирования и др.). Изучение трансформации форм элементов при поступлении в организм человека даёт возможность прогнозирования патологических состояний и, как следствие, перехода к профилактике заболеваний. Среди определяемых химических элементов особое внимание уделено группам редких и редкоземельных, поскольку изучению их биологических свойств в последние годы уделяется особо пристальное внимание как в России, так и за рубежом.

Цель. Изучение полного химического состава питьевых вод централизованного водоснабжения округов Мурманска и сравнение их с химическим составом вод водозабора «Центральный» Кировска с точки зрения предельно допустимых концентраций и биологически значимых концентраций, а также оценка полезности.

Методы. Использованы масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, потенциометрия, титриметрия. Термодинамические расчёты выполнены с помощью метода физико-химического (термодинамического) моделирования, реализованного в программном комплексе «Селектор».

Результаты. Показано различие химического состава вод в трёх округах Мурманска и Колы. Химический состав вод Первомайского округа отличается от вод других округов сравнительно более высокими концентрациями Y, Zr, La, Ce, U. Сопоставление химических составов вод округов Мурманска с химическим составом питьевых вод водозабора «Центральный» (Кировск) указывает на более высокие концентрации Ca, Mg, Sr, Ba, La, Ce и более низкие концентрации F⁻, Al, NO₃⁻, Na⁺, HCO₃⁻, U и pH. Показано изменение форм миграции элементов и новообразованных фаз в водопроводных водах и при параметрах желудка человека.

Заключение. Питьевые воды, разводимые по сетям в округах Мурманска, являются маломинерализованными, по всем элементам, кроме кремния, концентрации макро- и эссенциальных элементов в питьевых водах Мурманске не достигают нижних значений биологически значимых концентраций. Воды содержат редкие и редкоземельные элементы, для которых не определены уровни биологически значимых концентраций. С помощью термодинамического моделирования показано, что эти элементы при поступлении с водой в желудочно-кишечный тракт будут изменять формы миграции, станут более подвижными. В работе представлены в первом приближении формы миграции лантаноидов при разных параметрах желудка человека, хлориды которых влияют на свёртываемость крови.

Ключевые слова: питьевые воды; масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой; термодинамическое моделирование; предельно допустимые концентрации; биологически значимые концентрации; редкоземельные элементы; уран; здоровье; Мурманск.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Мазухина С.И., Дрогобужская С.В., Маслобоев В.А., Широкая А.А., Ионов Н.В., Закревский Ю.Н. Химический состав питьевых вод Мурманска и Колы, формы миграции элементов в водах и организме человека, сравнение с водами Кировска // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. XX–XX. DOI: 10.17816/humeco642784 EDN: PLMXNK

Рукопись поступила: 10.12.2024

Рукопись одобрена: 29.10.2025

Опубликована online: 14.11.2025

Chemical composition of drinking water in Murmansk and Kola, forms of element migration in waters and the human body, comparison with waters of Kirovsk

Svetlana I. Mazukhina¹, Svetlana V. Dorogobuzhskaya¹, Vladimir A. Masloboev¹, Anna A. Shirokaya¹, Nikolai V. Ionov¹, Yuriy N. Zakrevskiy^{2,3}

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems - Subdivision of the Federal Research Centre "Scientific Center of the Russian Academy of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia;

² Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;

³ Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The presented work is a logical continuation of the study of the chemical composition of drinking waters in different regions of the Murmansk region, assessing their impact on human health. The relevance of such studies is caused by the excess of the average Russian morbidity rates in a number of cities and districts of the Murmansk region. The use of modeling allows for new approaches to considering the issues of possible forms of migration of chemical elements in natural waters and the formation of newly formed phases depending on various parameters (chemical composition of water, pH, Eh, temperature, conditions of its formation, etc.). Studying the transformation of the forms of elements upon entry into the human body makes it possible to predict pathological conditions and, as a result, the transition to disease prevention. Among the identified chemical elements, special attention is paid to the groups of rare and rare earth elements (REE), since the study of their biological properties has been given special attention in recent years, both in Russia and abroad.

AIM: The study of the complete chemical composition of drinking waters of the centralized water supply districts of Murmansk and their comparison with the chemical composition of the waters of the Central intake of Kirovsk in terms of maximum permissible concentrations (MPC) and biologically significant concentrations (BSC), assessment of usefulness.

METHODS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), potentiometry, and titrimetry were employed. Thermodynamic calculations were performed using the physico-chemical (thermodynamic) modeling method implemented in the "Select" software package.

RESULTS: The difference in the chemical composition of waters in three districts of Murmansk and Kola is shown. The chemical composition of the waters of the Pervomaisky district differs from the waters of other districts in relatively higher concentrations of Y, Zr, La, Ce, U. A comparison of the chemical compositions of the waters of the districts of Murmansk with the chemical composition of the drinking waters of the Tsentralny intake (Kirovsk) indicates higher concentrations of Ca, Mg, Sr, Ba, La, Ce and lower concentrations of F⁻, Al, NO₃⁻, Na⁺, HCO₃⁻, U and pH. The change in the forms of migration of elements and newly formed phases in tap water and in the parameters of the human stomach is shown.

CONCLUSION: Drinking waters distributed through the networks in the Murmansk region are characterized by low mineralization. For all elements except silicon, the concentrations of macro- and Drinking waters distributed through the networks in the Murmansk region are characterized by low mineralization. For all elements except silicon, the concentrations of macro- and essential elements in Murmansk drinking waters do not reach the lower limits of biologically significant concentrations. The waters contain rare and rare-earth elements, for which levels of biologically significant concentrations have not been established. Thermodynamic modeling indicates that upon entering the gastrointestinal tract, these elements will alter their migration forms and become more mobile. The study presents, in the first approximation, the migration forms of lanthanides under different gastric parameters, noting that their chlorides influence blood coagulation. essential elements in Murmansk drinking waters do not reach the lower limits of biologically significant concentrations. The waters contain rare and rare-earth elements, for which levels of biologically significant concentrations have not been established. Thermodynamic modeling indicates that upon entering the gastrointestinal tract, these elements will alter their migration forms and become more mobile. The study presents, in the first approximation, the migration forms of lanthanides under different gastric parameters, noting that their chlorides influence blood coagulation.

Keywords: drinking water; ICP-MS; thermodynamic modeling; maximum permissible concentrations; biologically significant concentrations; rare-earth elements; uranium; health; Murmansk.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mazukhina SI, Dorogobuzhskaya SV, Masloboev VA, Shirokaya AA, Ionov NV, Zakrevskiy YuN. Analysis of the Chemical Composition of Murmansk Tap Water, Assessment of Usefulness. *Ekologiya cheloveka* (Human Ecology). 2025;32(10):XX–XX. DOI: 10.17816/humeco642784 EDN: PLMXNK

Received: 10.12.2024

Accepted: 29.10.2025

Published online: 14.11.2025

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License

© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

Сохранение здоровья людей является одной из стратегических задач Российской Федерации¹. В «Стратегии социально-экономического развития Мурманской области на период до 2025 г.» указана важность обеспечения населения региона качественной и безопасной питьевой водой². Основные проблемы в этом плане обусловлены не только качеством природных вод, но и их антропогенным загрязнением в процессе технологической водоподготовки питьевой воды, подаваемой с использованием централизованных систем холодного водоснабжения. Основной причиной возможного постепенного ухудшения качества воды является эксплуатация крайне изношенных инженерных сооружений, предназначенных для водоподготовки, транспортировки и подачи питьевой воды населению, износ которых достигает до 70% и непрерывно возрастает [1]. В 2022 г. качество питьевой воды централизованного водоснабжения ухудшилось. Доля проб воды, превышающих гигиенические нормативы, по санитарно-химическим показателям в среднем по Мурманской области составила 11,6%, по микробиологическим показателям — 0,98% [2].

В последние годы в регионе активизирована поставка фасованной питьевой воды, что существенно снижает риски для здоровья, однако степень потребления воды централизованного водоснабжения достаточно велика. Население необходимо снабжать не только безопасной, но и физиологически полноценной питьевой водой, поскольку снижение дефицита полезных и незаменимых макро- и микроэлементов только за счёт продуктов питания пока не достигается в силу разных причин [1].

Питьевая вода является одним из важнейших факторов среды обитания, определяющим здоровье человека, поэтому важно найти причинно-следственные связи между химическим составом питьевой воды и повышенной заболеваемостью населения [3, 4]. Согласно государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Мурманской области в 2023 году» [5], общая заболеваемость в Мурманской области выше среднероссийских показателей на 10,8%. В области выделяются территории неблагополучия, характеризующиеся превышением областного уровня по показателям первичной заболеваемости, среди которых Мурманск, а особо выделяется Кировск [2, 5, 6]. Территориями риска в последние годы (превышение среднероссийских показателей заболеваемости злокачественными новообразованиями, язвой желудка и двенадцатиперстной кишки, болезнями эндокринной системы, расстройствами питания и нарушением обмена веществ, нервной системы) является Мурманск. В Кировске наблюдаются значительные превышения по заболеваемости болезнями системы кровообращения и желудочно-кишечного тракта (ЖКТ): гастриты, дуодениты, язва желудка и двенадцатиперстной кишки, а также мочекаменной болезнью и болезнями костно-мышечной системы [2, 5, 6].

Всемирная организация здравоохранения в качестве приоритетных химических веществ, для которых имеются прямые доказательства воздействия на здоровье человека через питьевую воду (с учётом сравнительно низких концентраций и поглощённых доз), выделяет As, F⁻, NO₃⁻, Pb и Mn. Тем не менее на региональном уровне другие элементы, например, редкие и редкоземельные элементы (РЗЭ) также могут рассматриваться как потенциальные источники вреда здоровью человека. В живых организмах рассеянные и редкие элементы играют свою роль — они являются регуляторами биологических процессов. Не менее важно знать, что биохимическое значение имеет не только избыток какого-либо элемента, но и его недостаток [7]. Обоснованию таких оптимальных концентраций для различных химических элементов в геохимической среде посвящены работы В.В. Ковальского, заложившего основы геохимической экологии [8]. М.В. Барвиш и А.А. Шварц [7] указывают, что благодаря наличию микроэлементов питьевая вода может быть не только пригодной для питья,

¹ Федеральный закон от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения». Москва (редакция, действующая с 01.01.2022). Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/13636>. Дата обращения 28.11.2024.

² Постановление от 25.12.2013 г. № 768-ПП/20 «О Стратегии социально-экономического развития Мурманской области до 2020 года и на период до 2025 года». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/465602093>. Дата обращения: 16.12.2024.

но и полезной. Они предложили ввести термин «биологически значимая концентрация» (БЗК), это такая концентрация, при которой поступление элемента в организм человека с водой может сказываться на общем микроэлементном балансе человека. За нижний предел БЗК принимается величина, при которой поступление элемента в организм с питьевой водой составляет 5% от общего среднестатистического поступления, при этом ежедневное потребление питьевой воды равно 2 л. В работе представлены данные по среднесуточному потреблению человеком 49 элементов и нижнему пределу БЗК для воды [7].

Ранее выполнены работы по оценке условий формирования химического состава ряда природных вод Мурманской области, оценки их полезности и форм миграции элементов питьевых вод с учётом условий окружающей среды и физиологических показателей организма с помощью физико-химического (термодинамического) моделирования. Расчёты выполняли без упрощения системы, в рамках единой мультисистемы [9–12].

Цель исследования. Изучение полного химического состава питьевых вод централизованного водоснабжения округов Мурманска с точки зрения предельно допустимых концентраций (ПДК) и БЗК, оценка их полезности и сравнение с химическим составом вод водозабора «Центральный» Кировска.

МЕТОДЫ

Отбор шести проб питьевой воды централизованного водоснабжения Мурманска объёмом 1 л осуществляли в полипропиленовые ёмкости согласно ГОСТ Р 562374-2014. Анализ проб (определение полного химического состава) проводили с привлечением прецизионных методов анализа — масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, потенциометрии и титриметрии. Для измерения анионов Cl^- , NO_3^- и pH (Eh) использовали анализатор жидкости «Эксперт-001» (Россия), для F^- — иономер И-160 МИ (Беларусь), концентрации металлов и металлоидов измеряли на приборе ELAN 9000 DRC-e (Перкин Элмер, США). Для градуировки масс-спектрометра использовали многоэлементные растворы ICP-MS-68A, Solution A, B (High-purity Standards, США). Правильность анализа контролировали с помощью международных стандартных образцов состава вод CRM-TMDW-A, CWW-TM-A (High-purity Standards, США) и STOK-16, STOK-10 (Inorganic Ventures, США).

Все термодинамические расчёты выполняли с помощью метода физико-химического (термодинамического) моделирования, реализованного в программном комплексе «Селектор», разработанном под руководством проф. И.К. Карпова (Институт геохимии им. Виноградова СО РАН, Иркутск). Программный комплекс снабжён системой встроенных баз термодинамических данных, оснащён модулем формирования моделей различной сложности [13]. В физико-химическую модель включены 47 независимых компонентов (Al, B, Br, Ar, He, Ne, C, Ca, Cl, F, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, P, S, Si, Sr, Cu, Zn, Ni, Pb, V, Ba, U, Ag, Au, Co, Cr, Hg, As, Cd, Mo, Se, La, Ce, Zr, Pr, Nd, Sc, Ta, Y, H, O, e), 1174 зависимых компонентов, в том числе в водном растворе — 546, в газовой фазе — 76, жидких углеводородов — 111, твёрдых фаз, органических и минеральных веществ — 440. Набор твёрдых фаз мультисистемы сформирован с учётом минерального состава горных пород Балтийского щита [12, 14]. В настоящей работе программный комплекс используется для моделирования в системе «вода–порода–атмосфера», «вода–желудочный сок–кристаллическое вещество».

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью исследования химического состава питьевых вод и оценки их полезности проведён отбор шести проб питьевой воды централизованных систем холодного водоснабжения (осень 2023 г.) в трёх округах Мурманска — Октябрьском, Ленинском, Первомайском и в городе Кола (примыкает к Мурманску, имеют единую систему водоснабжения) и впервые выполнен полный химический анализ. Централизованное хозяйственно-питьевое водоснабжение населения Мурманской области осуществляется преимущественно за счёт поверхностных вод. Источниками водоснабжения Мурманска и Колы являются реки Кола и Тулома, а также озеро Большое³. Далее воды подвергаются обработке реагентами — серноокислым алюминием гранулированным, содой кальцинированной и жидким хлором. Точки отбора проб в жилых домах (с указанием адреса) в трёх округах Мурманска и в Коле показаны на рис. 1. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы: химические составы питьевых вод отличаются по значениям pH и макрокомпонентам (Na^+ , Si, Cl^- , SO_4^{2-}) в различных округах Мурманска. В Ленинском районе обнаружены более высокие концентрации Na^+ (10,7–11,1 мг/л) и Cl^- — 18,6 мг/л и более низкие значения pH (5,9–6,3), в остальных — pH (6,5–6,9). Это может быть связано с водоподготовкой — добавлением к природным водам с целью обеззараживания жидкого Cl_2 и

³ Рабочая программа контроля качества воды систем централизованного водоснабжения ГОУП «Мурманскводоканал» на 2021–2025 гг. Мурманск; 2021. 88 с. Режим доступа: <https://mvk051.ru/storage/app/media/Документы/Анализ%20питьевой%20воды/Рабочая%20программа%20контроля%20качества%20воды%20систем%20централизованного%20водоснабжения%20ГОУП%20Мурманскводоканал%20на%202021-2025гг.pdf> Дата обращения: 05.11.2024.

Na_2CO_3 , что было показано на примере водоподготовки в селе Ловозеро [10, 14]. Согласно рис. 2, который иллюстрирует отнесение воды к тому или иному типу на основании концентраций макроэлементов, образцы воды 5 и 6 можно отнести к сульфатно-кальциевому типу, а остальные (образцы 1–4) к хлоридно-натриевому, которые могли стать таковыми в результате водоподготовки. Химический состав вод Ленинского округа очень близок по составу (табл. 1, образцы 1 и 3), в то время как состав воды в точке 2 (Октябрьский округ) по химическому составу ближе к образцу 4 (Первомайский округ). Химический состав воды Колы близок по составу к образцу 5 (Октябрьский округ), но содержит больше натрия и хлора. Состав питьевой воды Первомайского округа отличается от вод других округов сравнительно более высокими концентрациями Y, Zr, La, Ce и U (см. табл. 1). Все исследованные образцы пригодны для питьевых целей, так как превышения ПДК не установлено (см. табл. 1), соответствуют СанПин 1.2.3685-21 и безвредны для населения⁴. Различия в химическом составе питьевых вод связаны скорее всего с разными источниками водоснабжения, но это предмет дальнейших исследований.

Подземные воды водозабора «Центральный», которые служат источниками водоснабжения Кировска и подвергаются только ультрафиолетовому обеззараживанию, содержат очень низкие концентрации Ca и Mg, эти воды относятся к гидрокарбонатно-натриевым (см. рис. 2). В то же время наблюдается превышение ПДК для pH и алюминия.

ОБСУЖДЕНИЕ

Использование при питьевом водоснабжении вод состава $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ приводит к возникновению сердечно-сосудистых заболеваний [15], при заболеваниях ЖКТ показаны минеральные воды, содержащие кальций [16], избыточный алюминий опасен для центральной нервной системы. Питьевые воды в округах Мурманска, Коле и водозаборе «Центральный» Кировска являются маломинерализованными, но концентрации Co, Ni, Zn, Cu, Ba, Sr в округах Мурманска и Коле на 2 порядка выше, чем в водозаборе «Центральный». Однако по всем элементам, кроме кремния, концентрации макро- и эссенциальных элементов [17, 18] в питьевых водах в Мурманске и Коле не достигают нижних значений БЗК, необходимо искать другие источники поступления элементов в организм. В то же время в бескальциевых водах Кировска наблюдается превышение нижних значений БЗК для Si, Se, Ag, Mo и U. Для урана установлен очень низкий предел БЗК — 0,037 мкг/л, для РЗЭ нормативы ПДК и нижние значения БЗК отсутствуют. Уран и РЗЭ могут оказывать негативное действие на костно-мышечную, нервную систему и другие органы [18, 19]. Воды Кольского полуострова содержат редкие элементы и РЗЭ природного и антропогенного происхождения, присутствуют они и в питьевых водах централизованного и нецентрализованного водоснабжения [12, 14, 16]. Следовательно, могут поступать в организм с питьевой водой и накапливаться [18].

Для живых организмов важна не только концентрация элементов, поступающих с водой, но и их химическая форма. Попадая в организм, в ЖКТ происходит изменение форм их миграции. Оценить это можно с помощью термодинамического моделирования. В работе S.I. Mazukhina и соавт. [11] представлены результаты исследования химического состава желудочного сока населения Апатитско-Кировского района и дана оценка изменения параметров желудочного сока в результате применения лечебных и питьевых вод. В результате исследования установлен факт, что у ряда пациентов наблюдается низкий уровень кислоты в желудке (гипохлоргидрия), в функции которой входит расщепление пищи, поглощение определённых питательных веществ, таких как белок и витамин B12, уничтожение бактерий и других патогенов в желудке. Причиной гипохлоргидрии могут быть возраст (желудок вырабатывает меньше кислоты в детском возрасте или в результате старения), лекарственные препараты, бактериальные инфекции⁵.

Информация о химическом составе желудочного сока, объёме желудка и температуре в нём, что необходимо для изучения процессов, происходящих в желудке, была получена из литературных источников [20–22]. В качестве аналитических данных выбрали химический состав желудочного сока (Ca^{2+} — 5,03; Na^+ — 1160; K^+ — 590; P — 3,18; HCl — 5000; H_2CO_3 — 1200; SO_4^{2-} — 10; NH_4OH — 80 мг/л), массу воды (993 г), среднюю температуру (+38 °C), давление ($1 \cdot 10^5$ Па — 1 бар) [9, 16]. Поскольку исследования такого типа проводились впервые, отсутствует стандартный образец химического состава здорового желудка, сравнение делали с приведённой идеальной моделью, составленной по литературным данным (рис. 3а). Как видно из рис. 3а, в системе «желудочный сок–концентрация Cl⁻» могут возникнуть окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные барьеры.

⁴ СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий». Москва; 2021. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573536177?marker=7DI0K8> Дата обращения: 05.11.2024.

⁵ Гипохлоргидрия: причины, симптомы и лечение. Режим доступа: <https://medicalinsider.ru/news/gipokhlorgidriya-prichiny-simptomy-i-lechenie> Дата обращения: 05.11.2024.

Исследования изменений pH и Eh и форм миграции элементов в системе «вода–желудочный сок» при условиях объёма желудочного сока 100 мл, температуре +38 °С, давлении 1 бар проводили при начальных условиях pH 6,24; Eh 0,280 В (недостаток HCl, C(Cl⁻) — 2284,6 мг/л; рис. 3b) и pH 2,02; Eh 0,0438 В (нормальная кислотность, C(Cl⁻) — 2872,3 мг/л; рис. 3c). Моделирование проводили для образца воды Первомайского района.

При поступлении в желудок питьевой воды происходит разбавление желудочного сока, pH постепенно возрастает, но после принятия более 200 мл воды происходит резкое изменение потенциала, что следует рассматривать как барьер (рис. 3b, c). На рис. 4 показано изменение форм миграции РЗЭ и редких элементов при поступлении воды в желудок. Для примера приведены данные для лантана, протактиния, циркония и урана. Лантан присутствует в разнообразных формах, при начальных условиях pH 6,24 в системе «вода–желудочный сок» лантан преобладает в форме La³⁺, LaCO₃⁺, LaCl²⁺ и LaOH²⁺ (рис. 4a), а при нормальной кислотности с pH 2,02 — La³⁺, LaCl²⁺, LaF²⁺ (рис. 4b). Присутствие соляной кислоты в желудке приводит к образованию хлоридов, а наличие фтора и сульфатов в воде — к образованию фторидов и сульфатов лантана. Изменение форм миграции протактиния в системе «вода–желудочный сок» при условии pH 6,24 приведёт к преобладанию Pr³⁺, PrCO₃⁺ и PrCl²⁺ (рис. 4c), а при pH 2,02 — Pr³⁺, PrCl²⁺ и PrCl₂⁺ (рис. 4d), в то время как в питьевой воде он присутствовал в виде PrCO₃⁺ и Pr³⁺. Фторирование вод будет приводить к увеличению подвижности лантаноидов. Таким образом, исследование форм миграции РЗЭ в водопроводной воде и в желудке при разном содержании HCl, что определяется индивидуальными особенностями организма, позволяет сделать следующие выводы: формы миграции РЗЭ в водопроводной воде и в желудке отличаются в зависимости от кислотности ЖКТ индивидуума. Легкие лантаноиды, по-видимому, обладают большими миграционными способностями, что хорошо демонстрируют данные моделирования. Это приводит к возможности преодоления естественных биологических барьеров организма, в частности гематоэнцефалического. В работе Н.В. Барановской и соавт. [19] методом электронной микроскопии и дисперсионного анализа доказано наличие церий-содержащих минеральных фаз в головном мозге изюбря, в организм которого поступали РЗЭ в ходе его жизнедеятельности.

Изменение форм миграции циркония в системе «вода–желудочный сок» при pH 6,24 приведёт к преобладанию ZrO₂ и HZrO₃⁻ (рис. 4d). При желудочном соке с pH 2,02 до введения объёма воды 100 мл вначале преобладают формы ZrOH³⁺, ZrO²⁺ и Zr⁴⁺, далее доля Zr⁴⁺ снижается, будет преобладать катион ZrO²⁺ (рис. 4f). В водопроводной воде Первомайского округа цирконий находится в следующих формах миграции — HZrO₃⁻ и ZrO₂. Среди форм миграции урана в системе «вода–желудочный сок» при начальных условиях pH 6,24 будет преобладать форма UO₂ (до 320 мл воды в желудке) с изменением значений Eh >0, далее уран будет переходить в шестивалентные формы UO₂OH⁺ и UO₃ (рис. 4g). При pH 2,02 будет преобладать форма UO₂, при добавлении 320 мл воды в желудок будет происходить изменение Eh >0 и уран будет переходить в шести- и пятивалентные формы UO₂²⁺ и UO₂⁺, тогда как в водопроводной воде он присутствовал преимущественно в виде UO₃ (рис. 4h). Основными органами депонирования как растворимых, так и нерастворимых соединений урана являются селезёнка, почки, скелет, печень, лёгкие и бронхолёгочные лимфатические узлы. На характер распределения оказывает влияние валентность урана.

На рис. 5 представлены составы новообразованных фаз в системе «вода–желудочный сок–кристаллическое вещество». Воды Первомайского района насыщены относительно следующих новообразованных фаз: FeO(OH), Na_{0,33}Al_{2,33}Si_{3,67}O₁₀(OH)₂, MnO₂ и SiO₂. В желудке происходит образование преимущественно фторапатита, сульфида железа и мусковита (KAl₂[AlSi₃O₁₀](OH)₂), количество которых возрастает при увеличении объёма воды. Анализ результатов указывает, что состав новообразованных фаз зависит от объёма воды в желудке и параметров желудочного сока (кислотности). Кроме того, существует и кинетический фактор — изменение валентности элементов и выпадение фаз в других органах и с временной отсрочкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Питьевые воды, разводимые по сетям в округах Мурманска и Колы, являются маломинерализованными, как и большинство природных вод Мурманской области. В ходе проведённого исследования показано, что они относятся (образцы 5 и 6) к сульфатно-кальциевому типу, а остальные (1–4) к хлоридно-натриевому, которые могли стать таковыми в результате химической обработки. Воды отличаются от гидрокарбонатно-натриевых вод водозабора «Центральный» Кировска, которые содержат очень низкие концентрации Ca и Mg. Концентрации макроэлементов и Co, Ni, Zn, Cu, Ba, Sr в питьевых водах Мурманска и Колы на два порядка выше, чем в водозаборе «Центральный», однако по всем элементам, кроме кремния, концентрации макро- и эссенциальных элементов в питьевых водах в Мурманске и Коле не достигают нижних значений БЗК, необходимо искать другие источники поступления элементов в организм. Воды содержат редкие элементы и РЗЭ, для которых не определены уровни БЗК. С помощью термодинамического моделирования показано, что эти элементы при поступлении с водой в ЖКТ будут изменять формы миграции и станут более подвижными. В

работе представлены в первом приближении формы миграции лантаноидов при разных параметрах желудка человека, хлориды которых влияют на свёртываемость крови. Редкие элементы и РЗЭ могут преодолевать естественные биологические барьеры организма, накапливаться и становиться причинами ряда заболеваний. Результаты представленных исследований могут быть полезны в областях химии, экологии и медицины.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.И. Мазухина, С.В. Дрогобужская — сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; С.В. Дрогобужская, А.А. Широкая — экспериментальные процедуры; С.И. Мазухина — программное обеспечение; В.А. Маслобоев — администрирование; Н.В. Ионов, Ю.Н. Закревский — отбор и подготовка образцов. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Не требуется, т.к. в статье представлены модельные данные, исследование с человеком не проводилось.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 24-17-00114 «Оценка химического состояния природных и питьевых вод Мурманской области, форм миграции, влияние на элементный статус жителей».

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: S.I. Mazukhina, S.V. Drogobuzhskaya: collection and analysis of literary sources, writing and editing of the article; S.V. Drogobuzhskaya, A.A. Shirokaya: experimental procedures; S.I. Mazukhina: software; V.A. Masloboev: administration; N.V. Ionov, Yu.N. Zakrevskiy: selection and preparation of samples. All authors approved the manuscript (the version for publication), and also agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring proper consideration and resolution of questions related to the accuracy and integrity of any part of it.

Ethics approval: Approval from the local ethics committee is not required.

Funding sources: The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation 24-17-00114 “Evaluation of the chemical state of natural and drinking waters of the Murmansk region, forms of migration, impact on the elemental status of residents”.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Improving the quality of drinking water supply in the Murmansk region as part of the implementation of the federal Clean Water project for 2019–2024. The regional program. Murmansk; 2019. 24 p. (In Russ.) URL: <https://docs.cntd.ru/document/561465271>
2. On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Murmansk region in 2022: materials for the state the report. Murmansk: Department of Rospotrebnadzor for the Murmansk region; 2023.

226 п. (In Russ.)

URL: https://51.rospotrebnadzor.ru/upload/medialibrary/4c3/vl7hxa9eesg3ol0f2irtz1aa7brl0hwa/ГД_Мурманская%20область_2022.pdf

3. Kovshov AA, Tikhonova NA, Fedorov VN, Novikova YuA. Analysis of the incidence in the population of Murmansk oblast in 2007–2019. *Health — the basis of human potential: problems and ways to solve them*. 2021;16(3):914–922. EDN: MGAUVG
4. Kovshov AA, Novikova YuA, Myasnikov IO, et al. Analysis of population health in relation to drinking water quality in Murmansk oblast. *Russian Arctic*. 2022;(4):5–16. doi: 10/24412/2658-4255-2022-4-05-16 EDN: QGYTCJ
5. On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Murmansk region in 2023: materials for the state report. Murmansk: Rospotrebnadzor; 2024. 214 p. (In Russ.) URL: <https://51.rospotrebnadzor.ru/content/866/72395>
6. On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2021: state report. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare; 2022. 340 p. (In Russ.) ISBN: 978-5-7508-1910-2
7. Bartish MV, Schwartz AA. A new approach to the assessment of the micro-component composition of groundwater used for drinking water supply. *Geoecology*. 2000;(5):467–473. (In Russ.)
8. Kovalsky VV. Geochemical ecology: Essays. Moscow: Nauka; 1974. 299 p. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007401788>
9. Mazukhina SI, Chudnenko KV, Tereshchenko PS, Drogobuzhskaya SV. Formation of concretions in human body under the influence of the state of environment of the Kola peninsula: thermodynamic modeling. *Chemistry for Sustainable Development*. 2020;28(2):193–201. doi: 10.15372/CSD2020219 EDN: UBZNQA
10. Mazukhina S, Drogobuzhskaya S, Sandimirov S, Masloboev V. Effect of water treatment on the chemical composition of drinking water: a case of Lovozero, Murmansk region, Russia. *Sustainability*. 2022;14(24):16996. doi: 10.3390/su142416996 EDN: JYZFHU
11. Mazukhina SI, Drogobuzhskaya SV, Tereshchenko PS, et al. Drinking water, influence on the chemical composition of gastric juice: monitoring and modeling. In: *Biogenic—Abiogenic Interaction in Natural and Anthropogenic Systems*. Springer, Cham; 2023. P. 573–586. doi: 10.1007/978-3-031-40470-2_34
12. Mazukhina SI, Sandimirov SS, Drogobuzhskaya SV. Physiological adequacy assessment of potable water in Lovozero district (Murmansk region, Russia). In: *Biogenic—Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems*. Springer, Cham; 2023. P. 617–633. doi: 10.1007/978-3-031-40470-2_37
13. Chudnenko KV. *Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications*. Novosibirsk: Geo; 2010. 287 p. (In Russ.) EDN: QKJKDL
14. Mazukhina SI, Drogobuzhskaya SV, Sandimirov SS, Masloboev VA. Features of changes in chemical composition of drinking water as a result of water treatment (Lovozero, Kola peninsula). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(10):243–252. doi: 10.18799/24131830/2023/10/4147 EDN: HXWLMQ
15. Krainov SR, Ryzhenko BN, Shvets VM. *Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects*. Moscow: Tsentrallitneftegaz; 2012. 670 p. (In Russ.) ISBN: 978-5-902665-48-9
16. Mazukhina SI, Maksimova VV, Chudnenko KV, et al. Water quality of the Arctic zone of the Russian Federation: physico-chemical modeling of water formation, forms of migration. Apatity: Kol'skii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk; 2020. 158 p. (In Russ.) doi: 10.37614/978.5.91137.437.2 EDN: EMVOWD
17. Skalnaya MG, Baranova OV. *Essential chemical elements: methodological guidelines*. Orenburg: OSU; 2012. (In Russ.) URL: <https://studfile.net/preview/16724648/>
18. Belisheva NK, Drogobuzhskaya SV. Rare earth element content in hair samples of children living in the vicinity of the Kola peninsula mining site and nervous system diseases. *Biology*. 2024;13(8):626. doi: 10.3390/biology13080626 EDN: SRSKNM
19. Baranovskaya NV, Mazukhina SI, Panichev AM, et al. Features of chemical elements migration in natural waters and their deposition in the form of neocrystallisations in living organisms (physico-chemical modeling with animal testing). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(2):187–201. doi: 10.18799/24131830/2024/2/4459 EDN: TBSHAL
20. Roitberg GE, Strutynsky AV. *Internal diseases. The digestive system*. Moscow: MEDpress-inform; 2007. 556 p. (In Russ.) EDN: XOWYWD
21. Korotko GF. *Gastric digestion*. Krasnodar: BK Group B LLC; 2007. 256 p. (In Russ.) EDN: OSPPCY
22. Borodulin VI, Topolyansky AV. *Handbook of a practical doctor in 2 books*. Moscow: Eksmo; 2008. (In Russ.) URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004109232/?ysclid=mhujqp1epk508075388

* Автор, ответственный за переписку	* Corresponding author
* Дрогобужская Светлана Витальевна , канд. хим. наук, доцент; адрес: Россия, 184209, Апатиты, Академгородок, д. 26а; ORCID: 0000-0002-1699-7584; eLibrary SPIN: 1207-1383; e-mail: s.drogobuzhskaia@ksc.ru	* Svetlana V. Drogobuzhskaya , Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor; address: 26a Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209; ORCID: 0000-0002-1699-7584; eLibrary SPIN: 1207-1383; e-mail: s.drogobuzhskaia@ksc.ru
Мазухина Светлана Ивановна , д-р геол.- минерал. наук; ORCID: 0000-0002-2715-4021; eLibrary SPIN: 9034-5445; e-mail: simazukhina@mail.ru	Svetlana I. Mazukhina , Dr. Sci. (Geology and Mineralogy); ORCID: 0000-0002-2715-4021; eLibrary SPIN: 9034-5445; e-mail: simazukhina@mail.ru
Маслобоев Владимир Алексеевич , д-р техн. наук; профессор; ORCID: 0000-0002-1536-921X; eLibrary SPIN: 2479-9043; e-mail: v.masloboev@ksc.ru	Vladimir A. Masloboev , Dr. Sci. (Engineering), Professor; ORCID: 0000-0002-1536-921X; eLibrary SPIN: 2479-9043; e-mail: v.masloboev@ksc.ru
Широкая Анна Александровна ; ORCID: 0000-0002-1325-2499; e-mail: a.shirokaia@ksc.ru	Anna A. Shirokaya ; ORCID: 0000-0002-1325-2499; e-mail: a.shirokaia@ksc.ru
Ионов Николай Васильевич ; ORCID: 0009-0003-5973-2441; e-mail: Nikolaiionov95@gmail.com	Nikolai V. Ionov ; ORCID: 0009-0003-5973-2441; e-mail: Nikolaiionov95@gmail.com
Закревский Юрий Николаевич , д-р мед. наук, профессор; ORCID: 0000-0003-4195-273X; eLibrary SPIN: 6283-8010; e-mail: zakrev.sever@bk.ru	Yuriy N. Zakrevskiy , MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; ORCID: 0000-0003-4195-273X; eLibrary SPIN: 6283-8010; e-mail: zakrev.sever@bk.ru

Таблица 1. Сопоставление химических составов водопроводных вод водозабора «Центральный» (Кировск), Колы и Мурманска (Ленинский, Октябрьский, Первомайский округа)

Table 1. Comparison of chemical compositions of tap waters of the Tsentralny water intake (Kirovsk), Kola and Murmansk (Leninsky, Oktyabrsky, Pervomaysky districts)

Элемент	БЗК	ПДК*	Химический состав вод водозабора «Центральный», мг/л			Химический состав водопроводных вод в округах Мурманска, мг/л					
						Ленинский		Октябрьский		Первомайский	Кола
			min	max	Me	образец					
						1	3	2	5	4	6
Li	0,025	0,03	0,0004	0,0010	0,0007	0,00077	0,00066	0,00071	0,00060	0,00022	0,00053
B	0,0325	0,5	0,0150	0,0169	0,0158	0,00041	0,0072	0,0185	0,0045	0,0175	0,00083
Na	112,5	200	11,5	29,2	19,1	11,5	11,0	5,72	3,75	5,92	5,53
Mg	7,5	50	0,002	0,042	0,020	1,12	1,13	1,11	1,38	1,05	1,66
Al	0,375	0,2	0,35	1,07	0,79	0,054	0,059	0,122	0,073	0,125	0,038
Si	0,3	20–25	1,65	1,91	1,79	1,34	1,32	3,39	3,35	3,33	3,12
P	—	—	0,015	0,032	0,023	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
K	75	—	1,17	4,15	2,27	0,71	0,70	0,50	0,83	0,52	0,91
Ca	27,5	—	0,008	0,24	0,10	3,08	3,12	2,78	3,36	2,83	3,70
V	0,025	0,1	0,0006	0,0066	0,0037	0,0014	0,0019	0,00005	0,00001	0,00003	0,00007
Cr	0,00375	0,05	0,0002	0,0017	0,0009	0,00049	0,00034	0,00030	0,00053	0,00042	0,00051
Mn	0,0925	0,1	0,0001	0,0004	0,0002	0,0096	0,0093	0,0054	0,014	0,0042	0,0052
Fe	0,375	0,3	0,005	0,021	0,015	0,163	0,155	0,058	0,189	0,163	0,036
Co	0,0075	0,1	0,00004	0,00016	0,00008	0,0018	0,00050	0,00037	0,00002	0,0010	0,00012
Ni	0,0075	0,02	0,00002	0,00019	0,00009	0,0055	0,0045	0,0021	0,0014	0,0024	0,0017
Cu	0,0875	1,0	0,00010	0,00029	0,00017	0,039	0,0025	0,029	0,143	0,028	0,0074
Zn	0,325	5,0	0,0034	0,0061	0,0048	0,022	0,022	0,020	0,020	0,0074	0,095
Sr	0,05	7,0	0,0002	0,0024	0,0011	0,024	0,024	0,019	0,027	0,019	0,033
Y	0,0004	—	0,00001	0,00005	0,00003	0,00002	0,00003	0,00001	0,00002	0,00004	0,000003
Zr	0,05	—	0,00001	0,00008	0,00005	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00005	0,00026	<0,00001
Se	0,00375	0,01	0,0006	0,216	0,072	0,00087	0,0014	0,00011	<0,00001	<0,00001	0,0024
Nb	0,0065	0,01	0,00006	0,0003	0,0002	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,00025	<0,00001	<0,00001
Mo	0,00625	—	0,0032	0,0115	0,0061	0,00011	0,00005	0,00013	0,00023	0,00016	0,00007
Ag	0,00125	0,05	0,0006	0,0018	0,0013	<0,00001	0,00024	<0,00001	0,00057	<0,00001	<0,00001
Cd	0,0025	0,001	0,00001	0,00004	0,000025	<0,00001	0,00001	<0,00001	0,00002	0,00006	0,00002
Ba	0,02	0,7	0,00003	0,00014	0,00009	0,0069	0,0071	0,0043	0,0061	0,0040	0,0056
La	—	—	0,00003	0,00018	0,00008	0,00006	0,00011	0,00001	0,00002	0,00012	0,00036
Ce	—	—	0,00001	0,00009	0,00006	0,00006	0,00015	0,00001	0,00001	0,00017	0,00001
U	0,000037	0,015	0,00011	0,0010	0,00043	0,00001	0,00001	0,00002	0,00002	0,00002	0,00001
Cl ⁻	—	350	1,25	2,58	2,03	18,5	18,7	4,31	5,48	3,74	6,08
pH	—	6–9	8,97	9,63	9,37	6,25	5,92	6,82	6,50	6,90	6,60

Примечание. * СанПиН 1.2.3685-21; БЗК — биологически значимые концентрации; ПДК — предельно допустимые концентрации; полужирный курсив — значения, превышающие ПДК; полужирный — значения, превышающие БЗК.

РИСУНКИ



Рис. 1. Точки отбора питьевых вод централизованного водоснабжения: в Ленинском округе 1 — ул. Инженерная, 6; 3 — ул. Аскольдовцев, 25; в Октябрьском округе 2 — ул. Радищева, 18; 5 — ул. Коммуны, 9; в Первомайском округе 4 — ул. Копытова, 21; в Коле 6 — ул. Красноармейская, 5.

Fig. 1. Points of selection of drinking water of centralized water supply — Leninsky district: 1 — Engineering Street, 6; 3 — Askoldovtsev Street, 25; Oktyabrsky district: 2 — Radishchev Street, 18; 5 — Commune Street, 9; Pervomaisky district: 4 — Kopytova Street, 21; Kola: 6 — Krasnoarmeyskaya Street, 5.

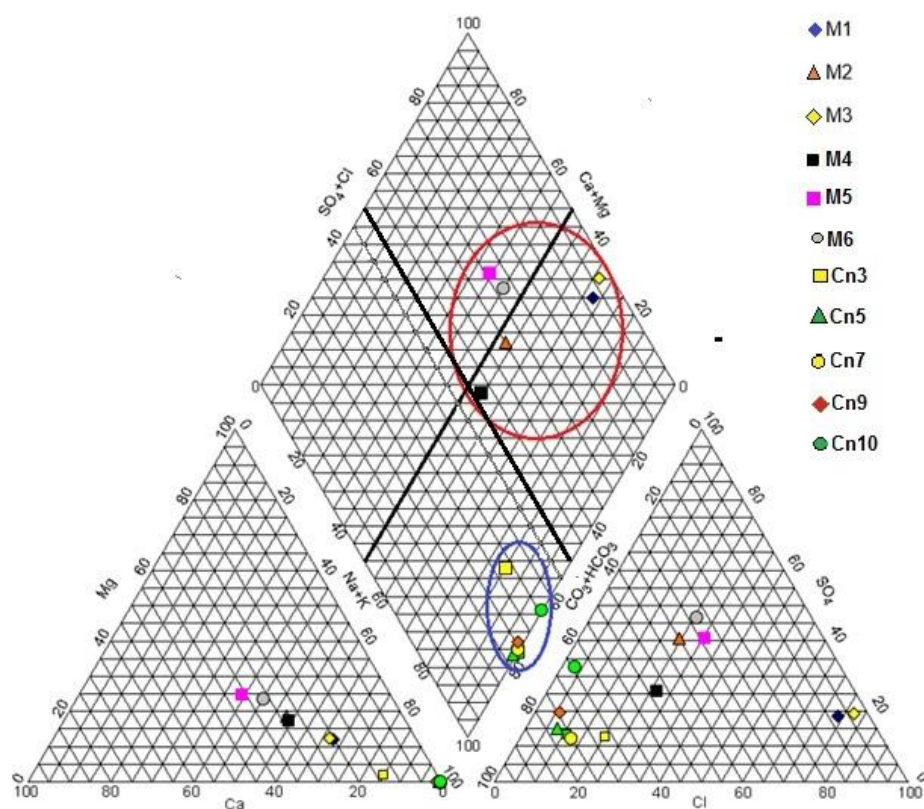


Рис. 2. Диаграмма Пайпера: M1–M6 — питьевые воды центрального водоснабжения Мурманска, Cn3–Cn10 — питьевые воды (подземные) водозабора «Центральный».

Fig. 2. Piper diagram — M1–M6 - drinking water of the central water supply of Murmansk, Cn3–Cn10 — drinking water (underground) of the Central water intake.

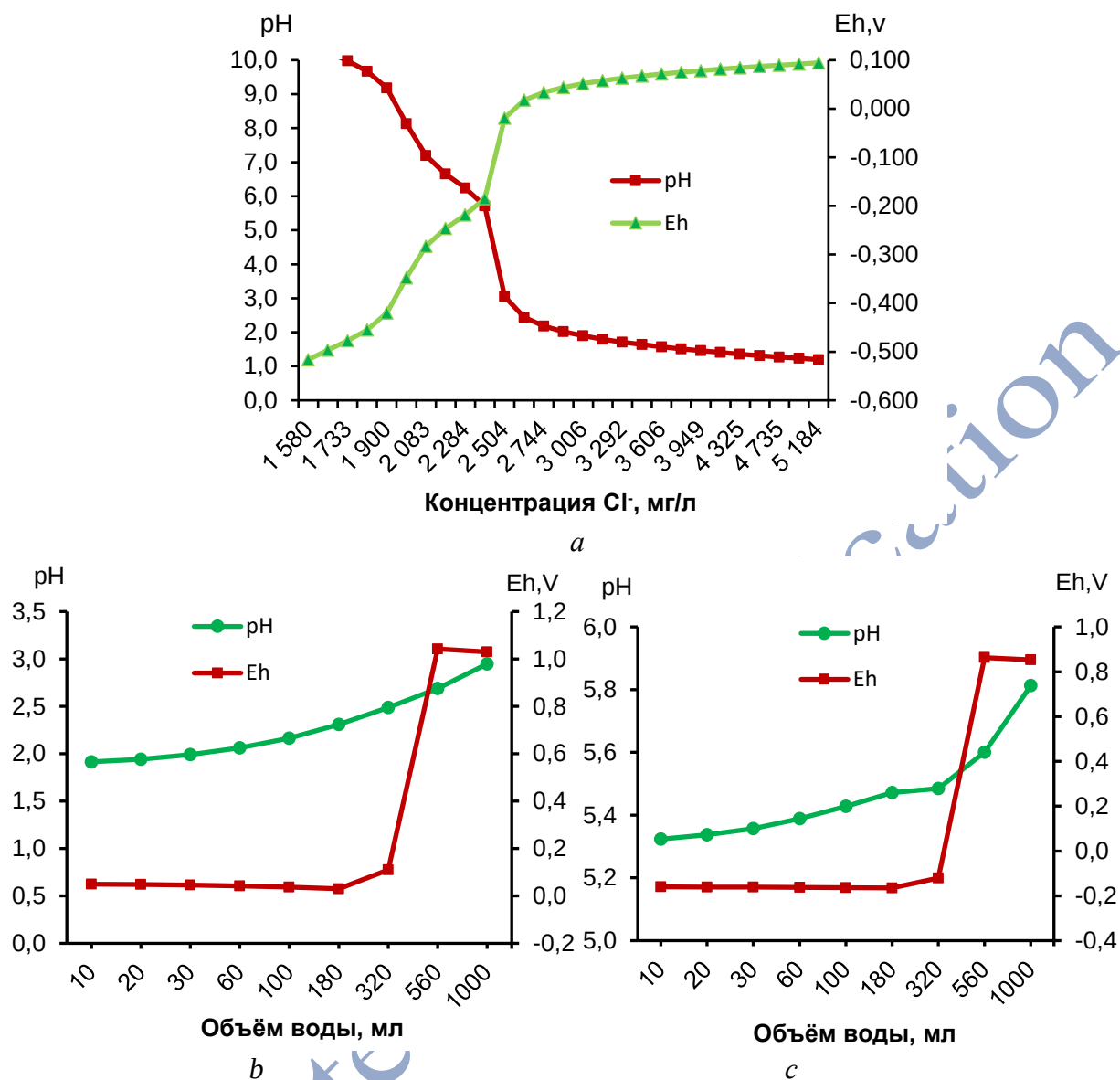
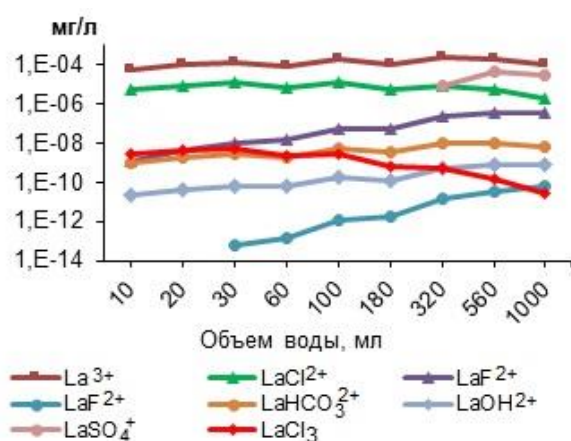
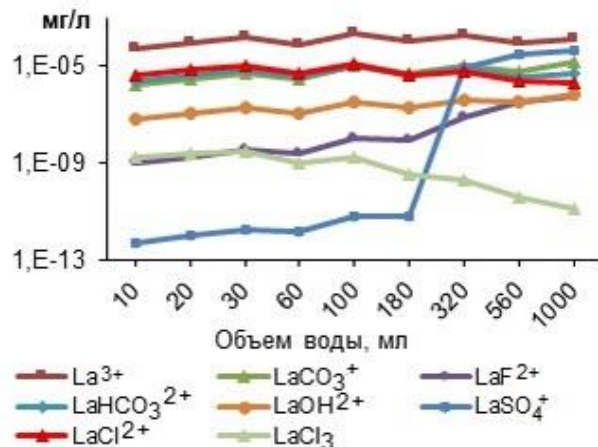


Рис. 3. Изменение значений pH и Eh в зависимости от концентрации Cl^- (a) и изменение значений pH и Eh в системе «вода–желудочный сок», объём 100 мл, температура +38 °С, давление 1 бар при начальных условиях pH 6,24; Eh 0,280 В (b); pH 2,02; Eh 0,044 В (c); вода Первомайского района.

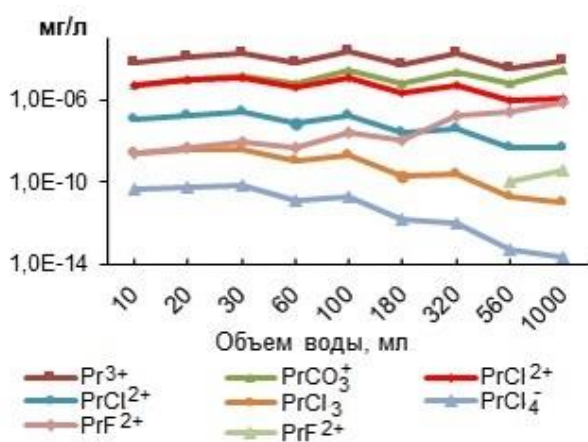
Fig. 3. Change in pH and Eh values depending on the concentration of Cl^- ; Change in pH and Eh values in the "water - GJ" system, V_{GJ} 100 ml, T +38°C, P 1 bar under initial conditions: b - pH 6.24; Eh 0.280 V, c - pH 2.02; Eh 0.044 V (Pervomaisky district water).



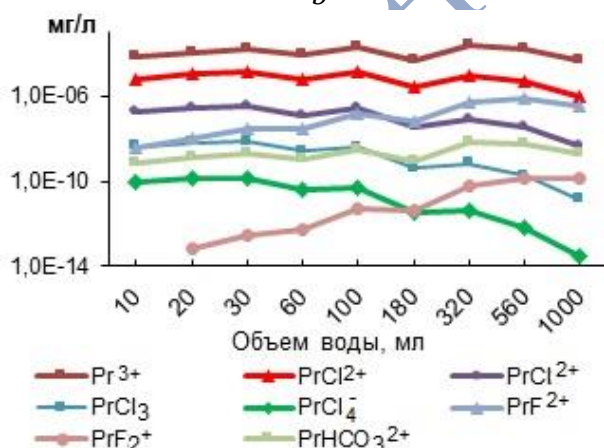
a



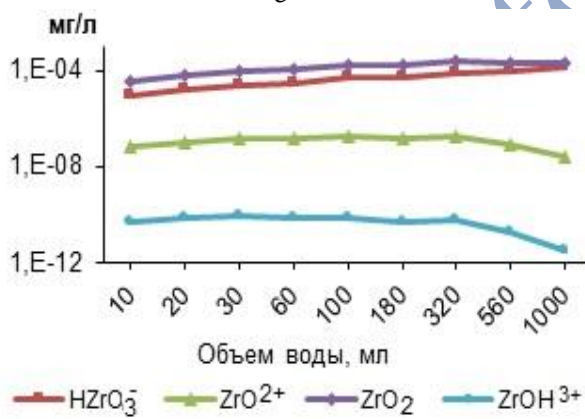
b



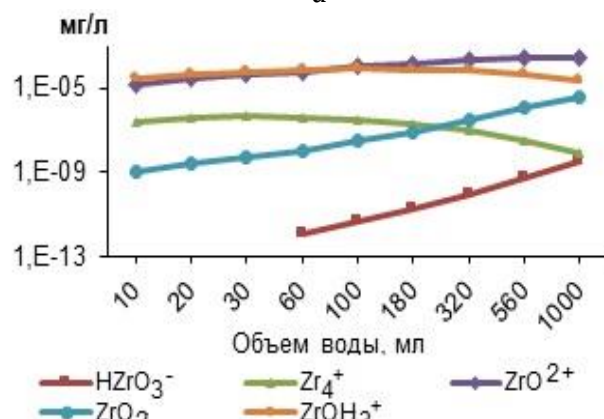
c



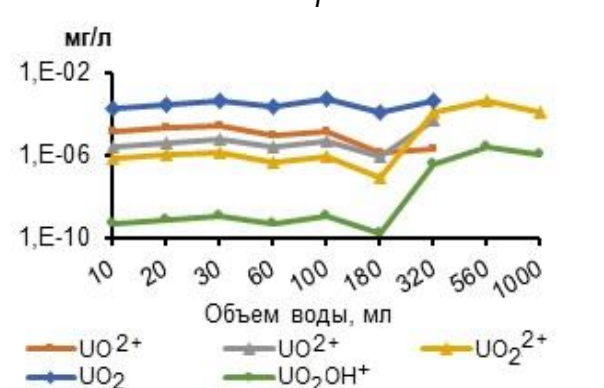
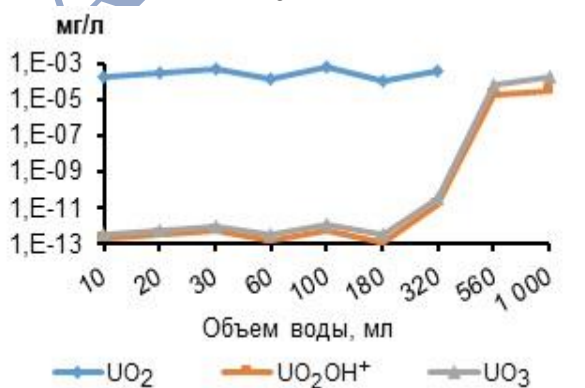
d



e



f



g

h

Рис. 4. Изменение форм миграции элементов в системе «вода–желудочный сок», объем 100 мл, температура +38 °С, давление 1 бар при начальных условиях pH 6,24; Eh 0,280V (а, с, е, g) и pH 2,02; Eh 0,0438V (b, d, f, h): лантана (а, d), протактиния (с, d), циркония (е, f) и урана (g, h).

Fig. 4. Changes in the forms of migration of elements in the "water - GJ" system, V_{GJ} 100 ml, T 38°C, P 1 bar under initial conditions pH 6.24; Eh 0.280 V (a, c, e, g) and pH 2.02; Eh 0.0438 v (b, d, f, h): lanthanum (a, b), protactinium (c, d), zirconium (e, f) and Uranium (g, h).

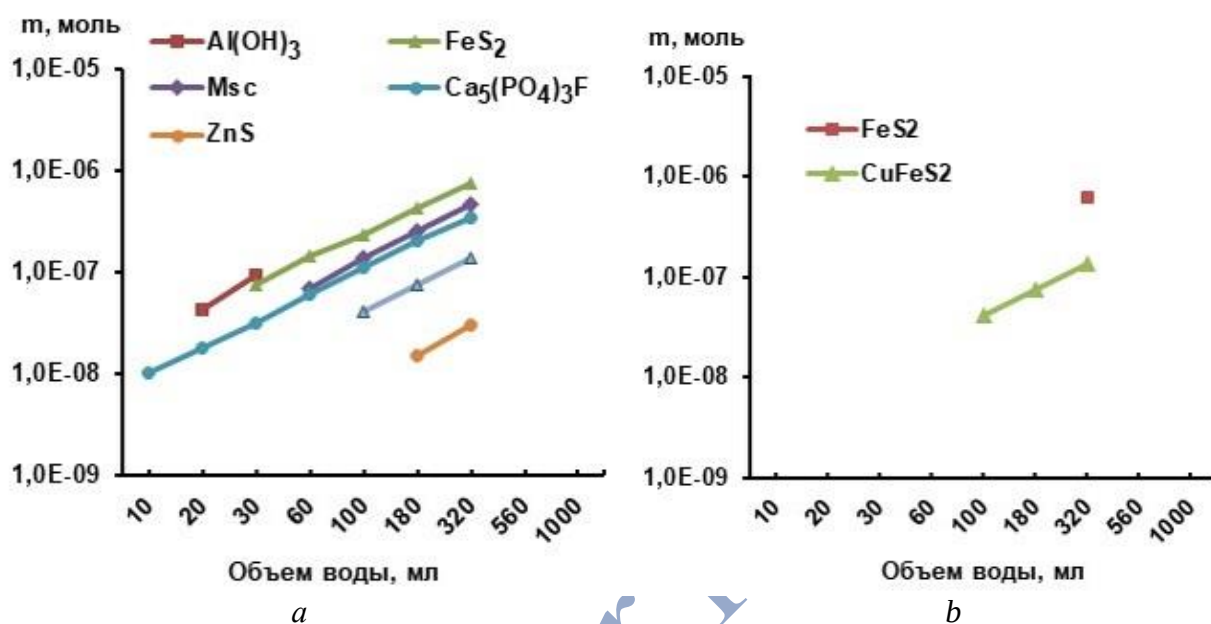


Рис. 5. Изменение состава фаз в системе «вода–желудочный сок–кристаллическое вещество», объем 100 мл, температура +38 °С, давление 1 бар при начальных условиях pH 6,24; Eh 0,280 В (а) и pH 2,02; Eh 0,0438 В (b).

Fig. 5. Phase composition change in the "water-GJ-crystalline substance" system, V_{GJ} 100 ml, T 38°C, P 1 bar at initial conditions pH 6.24; Eh 0.280 V (a) and pH 2.02; Eh 0.0438 V (b).