

УДК 614.7:504.43:546.65

ВЫЯВЛЕНИЕ ГАДОЛИНИЯ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Щучинов Л.В.¹, Кац В.Е.², Вторушина О.О.³, Савенко К.С.³, Новикова И.И.¹

¹ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены», Новосибирск, Россия

²АО «Алтай-Гео», Республика Алтай, Горно-Алтайск, Россия

³ФГБУН ИВЭП СО РАН, Барнаул, Россия

Интерес к редкоземельному элементу гадолинию вырос в конце XX века после начала использования в электронике, промышленности и здравоохранении. В медицине этот элемент применяется в контрастных веществах при проведении магнитно-резонансной томографии (МРТ). В последние годы выяснилось, что из-за постоянного роста МРТ-исследований увеличилось загрязнение поверхностных вод хелатами гадолиния, которые очень устойчивы во внешней среде. Установлено также, что гадолиний, попадая в организм человека, вмешивается в метаболизм и негативно влияет на здоровье.

Цель работы – определение концентраций гадолиния в природных водах Республики Алтай для оценки возможного влияния на здоровье населения.

Материалы и методы. Пробы воды отбирали в течение 12 лет (2013-2024 гг.) во всех муниципальных районах республики. В исследование вошли 5 объектов поверхностных вод и 118 объектов подземных вод, где на каждом объекте было отобрано от 1 до 3 проб. Наличие гадолиния выявляли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Всего было исследовано 170 проб. Анализ протоколов исследований природных вод проводили с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты. В подземных водах Республики Алтай фоновая концентрация гадолиния составила $0,059 \pm 0,02$ мкг/дм³, в поверхностных водах его содержание было ниже предела обнаружения. Наиболее высокие концентрации гадолиния установлены в воде 2 технических скважин: одна из них находится ниже хвостохранилища золотодобывающего предприятия ($0,38$ мкг/дм³- $1,80$ мкг/дм³), другая – в городе Горно-Алтайске ($0,839$ - $1,60$ мкг/дм³). В воде 12 из 116 исследованных объектов хозяйственно-питьевого водоснабжения (10,3%) концентрации гадолиния превышали естественный фон.

Ограничение исследования. Работа проведена на территории одного региона и с небольшим количеством отобранных проб (1-3 пробы) на каждом водном объекте, что может ограничивать обобщенность выводов.

Заключение. Деятельность горнодобывающих предприятий способствует загрязнению гадолинием (и другими РЗЭ) водных объектов, поэтому необходимо мониторировать состав близлежащих природных вод. Содержание гадолиния в 10,3% исследованных объектов хозяйственно-питьевого водоснабжения было выше фонового значения. Ввиду потенциальной токсичности гадолиния следует разработать санитарно-гигиенические нормативы его содержания для природных вод.

Ключевые слова: гадолиний, концентрации, мониторинг, подземные воды, поверхностные воды, здоровье человека, горнодобывающие предприятия, экология, редкоземельные элементы (РЗЭ)

Соблюдение этических стандартов. Проведение исследования не требовало одобрения этического комитета, поскольку работа не связана с использованием человека или животных в качестве объектов исследования.

Использование инструментов искусственного интеллекта. При подготовке рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Щучинов Л.В., Кац В.Е., Вторушина О.О., Савенко К.С., Новикова И.И. Выявление гадолиния в природных водах Республики Алтай. Медицина труда и экология человека. 2026; 2:196-211.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10208>

Для корреспонденции: Леонид Васильевич Щучинов, e-mail: leo2106@mail.ru

GADOLINIUM DETECTION IN NATURAL WATERS OF THE ALTAI REPUBLIC

Shchuchinov L.V.¹, Kats V.E.², Vtorushina O.O.², Savenko K.S.³, Novikova I.I.¹

¹Novosibirsk Research Institute of Hygiene, Novosibirsk, Russia

²JSC «Altai-Geo», Gorno-Altai, Russia

³Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

Gadolinium is a rare earth element whose widespread use in electronics, industry, and healthcare began only in the late 20th century. In medicine, gadolinium complexes form the basis of contrast agents used in magnetic resonance imaging (MRI). In recent years, it has been discovered that the constant increase in MRI examinations has led to an increase in surface water contamination with gadolinium chelates, which are highly stable in the environment. It has also been established that gadolinium, when ingested by the human body, interferes with metabolism and negatively impacts health.

The aim of this study was to analyze gadolinium concentrations in natural waters of the Altai Republic to determine the potential impact on public health.

Materials and Methods. Water samples were collected over 12 years (2013-2024) in all municipal districts of the republic. Gadolinium was detected using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). A total of 170 samples of natural water were analyzed using Microsoft Excel.

Results. In groundwater in the Altai Republic, background gadolinium concentrations were $0.059 \pm 0.02 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, while in surface waters, levels were below the detection limit. The highest gadolinium concentrations were found in the water of two technical wells: one located near a gold mining company's tailings dam ($0.38 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ - $1.80 \mu\text{g}/\text{dm}^3$), and the other in the city of Gorno-Altaiisk (0.839 - $1.60 \mu\text{g}/\text{dm}^3$). Gadolinium concentrations in the water of 12 of the 116 domestic and drinking water supply facilities studied (10.3%) exceeded the natural background level.

Study limitations. The study was conducted within a single region and with a small number of samples (1-3) from each water body, which may limit the generalizability of the findings.

Conclusion. Mining activities contribute to the contamination of water bodies with gadolinium (and other rare earth elements), so monitoring the composition of nearby natural waters is essential. Gadolinium concentrations in 10.3% of the drinking water sources was above background levels. Given the potential negative impact of gadolinium on the human body, work should continue to study its presence in drinking water, and hygienic standards for gadolinium should be introduced for natural waters.

Keywords: gadolinium, concentrations, monitoring, groundwater, surface water, human health, mining operations, ecology, rare earth elements (REEs).

Compliance with ethical standards. This study did not require approval by the Ethics Committee, as it did not involve humans or animals as research subjects.

Declaration of AI use. The authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

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

Funding. The study did not have sponsorship.

For citation: Shchuchinov L.V., Kats V.E., Vtorushina O.O., Savenko K.S., Novikova I.I. Gadolinium detection in natural waters of the Altai Republic. *Occupational Health and Human Ecology*. 2026;2:196-211.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10208>

For correspondence: Leonid V. Shchuchinov, e-mail: leo2106@mail.ru

Изучение распространения гадолиния (Gd) в природных водах Европы и США было начато в конце XX века из-за загрязнения рек контрастными веществами на его основе, применяемыми при магнитно-резонансной томографии (МРТ) [1]. Комплексы гадолиния (хелаты), разработанные как высокостабильные и неактивные соединения, выводятся из организма пациента через почки в течение 1,5–30 часов [2], а затем попадают в канализацию и на очистные сооружения, где во время процесса очистки остаются неизменными [3, 4]. В дальнейшем гадолиний вместе с очищенными сточными водами попадает в реки и озера, вызывая там повышение концентраций этого элемента [3-5]. Высокая стабильность комплексов гадолиния в окружающей среде делает их точными индикаторами загрязнения поверхностных и грунтовых вод [5], откуда они могут попасть в водопроводную сеть. Выявлено, к примеру, наличие антропогенного гадолиния в водопроводной воде в Берлине, Праге и Лондоне [3]. Влияние повышенных концентраций гадолиния на здоровье человека изучено недостаточно. Однако есть сообщения, что хелаты на основе гадолиния после МРТ-исследования накапливаются в мозге, почках и костях больных [6]. Исследования показали, что природный гадолиний более токсичен, чем хелаты: так как ионы природного гадолиния активно вмешиваются в метаболизм из-за способности замещать кальций, а в хелатах ион гадолиния окружен органическими молекулами аминокислоты (что делает его малоактивным) [7].

В Республике Алтай исследования природных вод на наличие гадолиния прежде не проводились, несмотря на актуальность этой темы.

Цель работы – определение концентраций гадолиния в природных водах Республики Алтай для оценки возможного влияния на здоровье населения.

Материалы и методы. В течение 12 лет (2013-2024 гг.) во всех муниципальных районах республики было отобрано 170 проб природных вод. В исследование вошли 123 объекта: 5 объектов поверхностных вод и 118 объектов подземных вод (59 скважин и 59 родников). На каждом водном объекте было забрано от 1 до 3 проб. Наличие гадолиния выявляли методом масс-спектрометрии с *индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС)* на масс-спектрометре *NexION 300D* в лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета.

Оценку содержания гадолиния проводили, анализируя протоколы исследований образцов воды. При статистической обработке данных использовали программу Microsoft Excel. За фоновую величину гадолиния в подземных водах принималось среднее арифметическое значение всех проб. При концентрациях ниже предела обнаружения в расчетах использовалась половина минимального значения – $0,0025 \text{ мкг/дм}^3$. Погрешность среднего определяли как частное от деления стандартного отклонения всех данных на квадратный корень объема данных.

Результаты. Хозяйственно-питьевое водоснабжение (ХПВ) в Республике Алтай основано на употреблении подземных вод, поэтому 95,3% всех исследованных проб были отобраны из скважин и родников, т.е. из подземных водоисточников. Фоновый уровень содержания гадолиния в подземных водах составил $0,059 \pm 0,02 \text{ мкг/дм}^3$.

Концентрация гадолиния на всех 5 объектах поверхностных вод (8 проб) была ниже предела обнаружения, т.е. $<0,005 \text{ мкг/дм}^3$.

Концентрации гадолиния в воде 14 объектов из 118 исследованных подземных водоисточников (11,9%) были выше среднего (фонового) значения. Особенно высокие концентрации отмечались в воде двух технических скважин (обе глубиной 10 м): одна из них находится рядом с хвостохранилищем золотодобывающего предприятия «Рудник «Веселый» в Чойском районе ($0,38 \text{ мкг/дм}^3$ - $1,80 \text{ мкг/дм}^3$), другая расположена на ул. Северная в г. Горно-Алтайске ($0,839$ - $1,60 \text{ мкг/дм}^3$), в ней после Алтайского землетрясения 2003 года существенно изменился химический состав воды. Вода из этих скважин не

используется для питья, она исследуется в рамках мониторинга: в первом случае для оценки загрязнения подземных вод отходами горнодобывающего производства, во втором случае для наблюдения за физическими и химическими свойствами воды при сейсмической активности. Максимальные концентрации гадолиния в этих скважинах значительно превышали средний уровень: в скважине золотодобывающего предприятия в 30,5 раза, а в скважине Горно-Алтайска – в 27,1 раза. Кроме того, на территории республики выявлено 12 объектов, вода из которых используется людьми для питья, где содержание гадолиния было выше фонового уровня (табл. 1).

Таблица 1. Аномальные значения концентраций гадолиния ($\geq 0,059$ мкг/дм³) в подземных водах Республики Алтай

Table 1. Abnormal levels of gadolinium (≥ 0.059 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$) in groundwater in the Altai Republic

№ п/п	Название объекта опробования	Кол-во проб на объекте	Содержание гадолиния (мкг/дм ³)
1	Скважина вблизи хвостохранилища «Рудник «Веселый» (Чойский район) – наблюдательная	3	0,38-1,80
2	Скважина в г. Горно-Алтайске по ул. Северная – наблюдательная	2	0,839-1,60
3	Скважина в с. Балыкча (Улаганский район)	1	0,72
4	Скважина в с. Оро (Усть-Канский район)	1	0,67
5	Скважина в с. Паспарта (Улаганский район)	2	0,180-0,530
6	Скважина в с. Элекмонар (Чемальский район)	2	0,061-0,380
7	Родник в с. Кара-Коба (Онгудайский район)	1	0,180
8	Родник «Маячный» в с. Турочак	1	0,104
9	Скважина в с. Каяшкан (Турочакский район)	1	0,093
10	Скважина в с. Еланда (Чемальский район)	1	0,085
11	Громатухинский родник в с. Усть-Кокса	1	0,078
12	Родник в с. Сухой Карасук (Чойский район)	1	0,075
13	Скважина в с. Абай (Усть-Коксинский район)	1	0,068
14	Скважина в с. Жана-Аул (Кош-Агачский район)	1	0,067

Повышенные концентрации гадолиния были установлены в 14,0% обследованных скважин, относящихся к ХПВ (8 из 57), и 6,8% родников (4 из 59 обследованных). Среди них выделяется скважина в с. Балыкча Улаганского района, где концентрация этого элемента в воде составила 0,72 мкг/дм³, что в 12,2 раза выше фонового уровня. Так как количество исследованных проб на водных объектах ХПВ было небольшим (1-3 пробы) необходимо провести дальнейшие исследования для уточнения содержания гадолиния и оценки его влияния на здоровье населения, употребляющего воду с повышенным содержанием этого элемента.

Обсуждение. Исследования зарубежных ученых показывают, что, поступая с питьевой водой, гадолиний в организме человека может замещать ионы Ca²⁺ и существенно влиять на биохимические процессы на клеточном уровне [1], а также накапливаться в тканях мозга, почек, костей [7].

Негативное воздействие гадолиния изучалось на пациентах, проходивших МРТ-графию с введением контрастных веществ. Изучены осложнения на большом количестве больных – 37788 человек, которое показало, что нежелательные явления при применении хелатов гадолиния встречались редко – всего у 0,12% пациентов [8]. Однако в литературе описаны и единичные тяжелые (смертельные) случаи при использовании контрастных веществ на основе гадолиния [9]. Среди побочных эффектов после прохождения МРТ с контрастом хорошо известен нефрогенный фиброз кожи у пациентов со сниженной функцией почек, при котором происходит утолщение и уплотнение кожи конечностей из-за увеличения количества дермальных фибробластоподобных клеток; причем при терминальной стадии почечной недостаточности вероятность развития этого осложнения высока – от 20,6% до 41,3% [10]. Обнаружено также, что гадолиний может накапливаться в центральной нервной системе у пациентов, прошедших как минимум пять МРТ-сканирований [11, 12]. Перечисленные осложнения требуют дальнейшего детального изучения влияния гадолиния на организм человека, а также исследований загрязнения им внешней среды, в том числе природных вод.

По оценке ученых из-за роста МРТ-исследований в поверхностные воды ежегодно поступает огромное количество гадолиния: в странах Европейского Союза – 19 тонн, а в США – 21 тонна [13], поэтому содержание этого элемента в реках крупных городов в сотни раз превышает естественный фон, который в поверхностных водах мира не превышает 0,181 мкг/л [5]. Неслучайно, гадолиний рассматривается сейчас как основной антропогенный загрязнитель питьевых вод, что подтверждается китайскими учеными, выявившими, что его концентрация в

сточных водах населенного пункта значительно выше, чем в поверхностных и грунтовых водах, причем после очистки сточных вод на очистных сооружениях канализации снижения содержания этого элемента не происходит [4].

В России так остро, как в западных странах, вопрос загрязнения гадолинием не стоит по двум причинам – из-за меньшей плотности населения и меньшего числа МРТ-исследований (число МРТ-аппаратов в нашей стране в 7 раз меньше, чем в среднем в мире). В отечественных публикациях, где представлены исследования РЗЭ в природных водах Сибири (в Забайкальском крае [14], в Красноярском крае, Новосибирской области, Кемеровской области, Алтайском крае [15], Томской области [16], Республике Алтай [15, 17], Хакасии [18]), было отмечено, что концентрации гадолиния в подземных водах составляют 0,0025-0,51 мкг/дм³, а в поверхностных водах – 0,001-0,24 мкг/дм³, что согласуется с нашими результатами. Однако на территориях горнодобывающих предприятий концентрации гадолиния были намного выше: в поровых водах хвостохранилищ Джидинского ГОК – 125 мкг/дм³, Бом-Горхонского горно-обогатительного комбината (ГОК) – 69 мкг/дм³ [19]; а в водах из дренажных стоков хвостохранилища Орловского месторождения тантала – 0,006-237 мкг/дм³ [20].

Исследования показывают, что концентрации гадолиния (как и других РЗЭ) в подземных водах зависят от минералов водовмещающих пород [20, 21] и от деятельности горнодобывающих предприятий [4, 19, 20]. В нашей работе также установлено, что аномально высокий уровень гадолиния в воде скважины, расположенной вблизи золотодобывающего предприятия, связан с попаданием в водоносный горизонт отходов этого производства, а высокая концентрация этого элемента в скважине г. Горно-Алтайска – с естественными причинами: увеличением проницаемости земной коры и появлением потоков между водными резервуарами при сейсмических толчках [22].

Ввиду данных о токсичности гадолиния, а также ожидаемого роста МРТ-исследований в России, возникает необходимость нормирования этого элемента в питьевых водах, так как в утвержденных ныне санитарных правилах СанПиН 1.2.3685-21¹⁶ гигиенические стандарты для него отсутствуют. Из-за новизны этой темы в других странах нормы содержания гадолиния в подземных и поверхностных водах тоже не введены [23]. Проблема загрязнения гадолинием природных вод усугубляется недавно открытым фактом, что хелаты Gd все-таки

¹⁶ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»

разлагаются, высвобождая активные ионы Gd под действием УФ-излучения (к примеру, на очистных сооружениях канализации, где применяется метод обеззараживания ультрафиолетом) [13].

Заключение. Фоновая концентрация гадолиния в подземных водах Республики Алтай составила $0,059 \pm 0,02$ мкг/дм³, а в исследованных пробах поверхностных вод его содержание было ниже предела обнаружения.

Наиболее высокие концентрации гадолиния установлены в воде 2 технических (наблюдательных) скважин: одна из которых находится около хвостохранилища горнодобывающего предприятия «Рудник «Веселый» ($0,38 - 1,80$ мкг/дм³), другая – в г. Горно-Алтайске на ул. Северной ($0,839 - 1,60$ мкг/дм³).

Среди объектов хозяйственно-бытового водоснабжения аномальные концентрации гадолиния обнаружены в 12 водоисточниках, в том числе в 8 из 57 обследованных скважин (14,0%) и в 4 из 59 обследованных родников (6,8%). Среди них отличалась скважина в с. Балыкча Улаганского района, где концентрация гадолиния в воде составила $0,72$ мкг/дм³, что в 12,2 раза выше фонового уровня.

Ввиду потенциальной токсичности гадолиния следует продолжить работу по исследованию содержания этого элемента на объектах ХПВ, а также установить его санитарные нормы в природных водах. Требуется исследования состояния здоровья населения, употребляющего воду из источников с аномальными концентрациями гадолиния.

Также необходимо изучить содержание этого элемента в отходах горнодобывающих предприятий для оценки их переработки с целью извлечения РЗЭ и организовать мониторинг природных вод, находящихся рядом с горнодобывающими предприятиями.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования – Щучинов Л.В.

Сбор и обработка материала – Кац В.Е., Вторушина О.О., Савенко К.С., Щучинов Л.В.

Анализ данных – Щучинов Л.В., Кац В.Е., Савенко К.С., Вторушина О.О.

Написание текста и оформление статьи – Щучинов Л.В.

Редактирование – Новикова И.И.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contribution:

Concept and design of the study – Shchuchinov L.V.

Collection and processing of material – Katz V.E., Vtorushina O.O., Savenko K.S., Shchuchinov L.V.

Data analysis – Shchuchinov L.V., Katz V.E., Vtorushina O.O., Savenko K.S.

Writing the text and designing the article – Shchuchinov L.V.

Editing – Novikova I.I.

All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Список литературы:

1. Bau M., Dulski P. Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996;143:245-255. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00127-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00127-6)
2. Idée J.M., Port M., Robic C., Medina C., Sabatou M., Corot C. Role of thermodynamic and kinetic parameters in gadolinium chelate stability. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2009;30:1249-1258. <https://doi.org/10.1002/jmri.21967>
3. Kulaksız S., Bau M. Anthropogenic gadolinium as a microcontaminant in tap water used as drinking water in urban areas and megacities. *Appl. Geochemistry.* 2011;26:1877-1885. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.06.011>
4. Liu H.Y., Guo H.M., Pourret O., Wang Z. Anthropogenic impact of rare earth elements on groundwater and surface water in the watershed of the largest freshwater lake in China. *Sci. Total Environ.* 2024;949:175063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175063>
5. Rogowska J., Olkowska E., Ratajczyk W., Wolska L. Gadolinium as a new emerging contaminant of aquatic environments. *Environ. Toxicol. Chem.* 2018;37:1523-1534. <https://doi.org/10.1002/etc.4116>
6. Rogosnitzky M., Branch S. Gadolinium-based contrast agent toxicity: A review of known and proposed mechanisms. *BioMetals.* 2016;29:365-376. <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9931-7>

7. Unruh C., Van Bavel N., Anikovskiy M., Prenner E.J. *Benefits and detriments of gadolinium from medical advances to health and ecological risks*. *Molecules*. 2020;25(23):5762. <https://doi.org/10.3390/molecules25235762>
8. Bruder O., Schneider S., Pilz G., et al. Update on acute adverse reactions to gadolinium based contrast agents in cardiovascular MR. Large multi-national and multi-ethnic population experience with 37788 patients from the EuroCMR registry. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2015;17:58. <https://doi.org/10.1186/s12968-015-0168-3>
9. Hallo-Carrasco A., Eldrige J., Provenzano DA, et al. Hidden risk of gadolinium-based contrast agents during interventional pain medicine procedures: a retrospective chart review. *Regional Anesthesia & Pain Medicine* 2024;49:751-756. <https://doi.org/10.1136/rapm-2023-104952>
10. Wagner B., Drel V., Gorin Y. Pathophysiology of gadolinium-associated systemic fibrosis. *Am. J. Physiol. Physiol.* 2016;311:1-11. <https://doi.org/10.1152/ajprenal.00166.2016>
11. Kanda T., Nakai Y., Hagiwara A., Oba H., Toyoda K., Furui S. Distribution and chemical forms of gadolinium in the brain: a review. *Br. J. Radiol.* 2017;90:20170115. <https://doi.org/10.1259/bjr.20170115>
12. Gaman L., Radoi M.P., Delia C.E., Luzardo O.P., Zumbado M., Rodríguez-Hernández Á., Stoian I., Gilca M., Boada L.D., Henríquez-Hernández L.A. Concentration of heavy metals and rare earth elements in patients with brain tumours: Analysis in tumour tissue, non-tumour tissue, and blood. *Int. J. Environ. Health Res.* 2021;31:741-754. <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1685079>
13. Brünjes R., Hofmann T. Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems. *Water Res.* 2020;182:115966. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115966>
14. Дребот В.В., Лепокурова О.Е., Борзенко С.В. Геохимия редкоземельных элементов в подземных водах Юго-Восточного Забайкалья. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2025; 9: 127-141. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/9/5194>
15. Пасечник Е.Ю., Савичев О.Г., Домаренко, В.А., Владимирова О.Н. Редкоземельные элементы в поверхностных и подземных водах верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней и Средней Оби (Западная Сибирь). *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*. 2020;32:113-127. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.32.113>
16. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Максимова А.А., Николенко О.Д., Деркачев А.С., Фомина (Садыкова) Я.В., Хващевская А.А. Распределение химических элементов в системе вода–порода (на примере Железнодорожного ключа в

- долине реки Ини). Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025;336(2):201-214. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/2/4759>
17. Бородина Е.В., Бородина У.О. Особенности состава поверхностных вод бассейна р. Кучерлы (Горный Алтай). Водные ресурсы. 2020;4:368-379. <http://dx.doi.org/10.31857/S0321059620040045>
18. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Леушина С.К. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах Хакасии. Известия Томского политехнического университета. 2013;32 (1):141-146.
19. Плюснин А.М., Дабаева В.В., Жамбалова Д.И., Перязева Е.Г., Ташлыков В.С. Редкие земли в поверхностных и подземных водах на территории размещения вольфрамдобывающего производства Забайкалья. Геохимия. 2020; 65(7):711-728. <http://dx.doi.org/10.31857/S0016752520060102>
20. Абрамова В.А., Замана Л.В. Редкоземельные элементы в водах геотехногенных объектов редкометалльных месторождений Восточного Забайкалья. Геосферные исследования. 2023;3:86-97. <https://doi.org/10.17223/25421379/28/7>
21. Noack C.W., Dzombak D.A., Karamalidis A.K. Rare earth element distributions and trends in natural waters with a focus on groundwater. Environ. Sci. Technol. 2014;48:4317-4326. <https://doi.org/10.1021/es4053895>
22. Щучинов Л.В., Кац В.Е., Ролдугин В.В., Новикова И.И. Исследование косейсмических геотермических реакций подземных вод Горно-Алтайска в афтершоковый период Чуйского землетрясения (2004-2023 гг.) // Медицина труда и экология человека. 2024; 3: 132-146. DOI: 10.24412/2411-3794-2024-10308
23. Guo H., Liu H., Pourret O., Ri M., Wang_Z. *Hydrogeochemical and health implications of rare earth elements in groundwater: A review*. Journal of Hydrology. 2025:132704. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132704>

References:

1. Bau M., Dulski P. Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters. Earth Planet. Sci. Lett. 1996;143:245-255. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00127-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00127-6)
2. Idée J.M., Port M., Robic C., Medina C., Sabatou M., Corot C. Role of thermodynamic and kinetic parameters in gadolinium chelate stability. J. Magn. Reson. Imaging. 2009;30:1249-1258. <https://doi.org/10.1002/jmri.21967>
3. Kulaksız S., Bau M. Anthropogenic gadolinium as a microcontaminant in tap water used as drinking water in urban areas and megacities. Appl. Geochemistry. 2011;26:1877-1885. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.06.011>

4. Liu H.Y., Guo H.M., Pourret O., Wang Z. Anthropogenic impact of rare earth elements on groundwater and surface water in the watershed of the largest freshwater lake in China. *Sci. Total Environ.* 2024;949:175063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175063>
5. Rogowska J., Olkowska E., Ratajczyk W., Wolska L. Gadolinium as a new emerging contaminant of aquatic environments. *Environ. Toxicol. Chem.* 2018;37:1523-1534. <https://doi.org/10.1002/etc.4116>
6. Rogosnitzky M., Branch S. Gadolinium-based contrast agent toxicity: A review of known and proposed mechanisms. *BioMetals.* 2016;29:365-376. <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9931-7>
7. Unruh C., Van Bavel N., Anikovskiy M., Prenner E.J. *Benefits and detriments of gadolinium from medical advances to health and ecological risks.* *Molecules.* 2020;25(23):5762. <https://doi.org/10.3390/molecules25235762>
8. Bruder O., Schneider S., Pilz G., et al. Update on acute adverse reactions to gadolinium based contrast agents in cardiovascular MR. Large multi-national and multi-ethnic population experience with 37788 patients from the EuroCMR registry. *J Cardiovasc Magn Reson.* 2015;17:58. <https://doi.org/10.1186/s12968-015-0168-3>
9. Hallo-Carrasco A., Eldrige J., Provenzano DA, et al. Hidden risk of gadolinium-based contrast agents during interventional pain medicine procedures: a retrospective chart review. *Regional Anesthesia & Pain Medicine* 2024;49:751-756. <https://doi.org/10.1136/rapm-2023-104952>
10. Wagner B., Drel V., Gorin Y. Pathophysiology of gadolinium-associated systemic fibrosis. *Am. J. Physiol. Physiol.* 2016;311:1–11. <https://doi.org/10.1152/ajprenal.00166.2016>
11. Kanda T., Nakai Y., Hagiwara A., Oba H., Toyoda K., Furui S. Distribution and chemical forms of gadolinium in the brain: a review. *Br. J. Radiol.* 2017; 90: 20170115. <https://doi.org/10.1259/bjr.20170115>
12. Gaman L., Radoi M.P., Delia C.E., Luzardo O.P., Zumbado M., Rodríguez-Hernández Á., Stoian I., Gilca M., Boada L.D., Henríquez-Hernández L.A. Concentration of heavy metals and rare earth elements in patients with brain tumours: Analysis in tumour tissue, non-tumour tissue, and blood. *Int. J. Environ. Health Res.* 2021;31:741-754. <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1685079>
13. Brünjes R., Hofmann T. Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems. *Water Res.* 2020;182:115966. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115966>
14. Drebot V.V., Lepokurova O.E., Borzenko S.V. Geochemistry of rare earth elements in groundwater of South-Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic*

- University. Geo Assets Engineering*, 2025;336(9):127-141. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/9/5194>
15. Pasechnik E.Yu., Savichev O.G., Domarenko V.A., Vladimirova O.N. Rare Earth Elements in Surface and Underground Waters of the Upper Hydrogeodynamic Zone in the Upper and Middle Obi Basin (Western Siberia). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*. 2020;32:113-127. (In Russ.) <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.32.113>
16. Novikov D.A., Vakulenko L.G., Maksimova A.A., Nikolenko O.D., Derkachev A.S., Fomina (Sadykova) Ya.V., Khvacshevskaya A.A. Distribution of chemical elements in the water–rock system (based on the example of a Zheleznodorozhny spring in the valley of the Inya river). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025; 336(2):201-214. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/2/4759>
17. Borodina E.V., Borodina U.O. Features of the composition of surface waters in the Kucherla River basin (Altai Mountains). *Vodnye resursy*. 2020;4:368-379. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.31857/S0321059620040045>
18. Guseva N.V., Kopylova Ju.G., Leushina S.K. Prevalence of rare earth elements in natural waters of Khakassia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013; 32(1):141-146. (In Russ.)
19. Plyusnin A.M., Dabaeva V.V., ZHambalova D.I., Peryazeva E.G., Tashlykov V.S. Rare earth elements in surface and groundwater in the area of tungsten mining production in Transbaikalia. *Geohimiya*. 2020;65(7):711-728. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.31857/S0016752520060102>
20. Abramova V.A., Zamana L.V. Rare-earth elements in the waters of geotechnogenic objects of rare metal deposits of Eastern Transbaikalia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2023;3:86-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/25421379/28/7>
21. Noack C.W., Dzombak D.A., Karamalidis A.K. Rare earth element distributions and trends in natural waters with a focus on groundwater. *Environ. Sci. Technol*. 2014;48:4317-4326. <https://doi.org/10.1021/es4053895>
22. Shchuchinov L.V., Kats V.E., Roldugin V.V., Novikova I.I. Study of coseismic geothermal reactions of groundwaters in the town of Gorno-Altaysk during the aftershock period of the Chuye earthquake (2004-2023). *Meditina truda i ekologiya cheloveka*. 2024;3: 132-146. [In Russ.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10308>
23. Guo H., Liu H., Pourret O., Ri M., Wang_Z. *Hydrogeochemical and health implications of rare earth elements in groundwater: A review*. *Journal of Hydrology*. 2025:132704. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132704>

Информация об авторах:

Леонид Васильевич Щучинов – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора. Россия, 630108, г. Новосибирск. Тел. 8-913-999-92-21, e-mail: leo2106@mail.ru , ORCID iD: 0000-0003-4691-752X

Валентина Елизаровна Кац – ведущий специалист Акционерного общества «Геологическое предприятие «Алтай-Гео» (АО «Алтай-Гео»), 649100, Республика Алтай, тел. 8-909-508-75-13, e-mail: KazWaly@yandex.ru, ORCID iD: 0009-0002-2202-5906

Вторушина Ольга Олеговна – инженер-геолог Акционерного общества «Геологическое предприятие «Алтай-Гео» (АО «Алтай-Гео»), 649100, Республика Алтай, тел. 89136946605, E-mail: olga-vtoryshina@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0009-0006-2844-0309>

Савенко Ксения Сергеевна – научный сотрудник ФГБУН Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, 656038, г. Барнаул, тел. 8-906-970-31-75, e-mail: kassisavenko@gmail.com, ORCID iD: 0009-0004-9903-7299

Новикова Ирина Игоревна – доктор медицинских наук, профессор, директор ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора, Россия, 630108, г. Новосибирск, e-mail: novikova_ii@niig.su, ORCID iD: 0000-0003-1105-471X

Author information:

Leonid V. Shchuchinov, Cand. Sci. (Med.), Leading Researcher, the Federal Budgetary Institution «Novosibirsk Research Institute of Hygiene» of Rospotrebnadzor; Russia, 630108, Novosibirsk, tel. 8-913-999-92-21, e-mail: leo2106@mail.ru , ORCID iD: 0000-0003-4691-752X

Valentina E. Kats, Leading Specialist of Joint Stock Company Geological Enterprise «Altai-Geo» (JSC «Altai-Geo»), 649100, the Altai Republic, tel. 89095087513. e-mail: KazWaly@yandex.ru, ORCID iD: 0009-0002-2202-5906

Olga O. Vtorushina, Geological Engineer of Joint Stock Company Geological Enterprise «Altai-Geo» (JSC «Altai-Geo»), 649100, the Altai Republic, tel. 89136946605, E-mail: olgavtoryshina@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0009-0006-2844-0309>

Ksenia S. Savenko, researcher, Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 656038, Barnaul, tel. 8-906-970-31-75, e-mail: kassisavenko@gmail.com, ORCID iD: 0009-0004-9903-7299

Irina I. Novikova – Dr. Sci. (Med.), Professor, Director of the Federal Budgetary Institution «Novosibirsk Research Institute of Hygiene» of Rospotrebnadzor, Russia, 630108, Novosibirsk, e-mail: novikova_ii@niig.su, ORCID iD: 0000-0003-1105-471X

Поступила/Received: 03.03.2026

Принята в печать/Accepted: 30.03.2026