

УДК 614.7:504.43:546.657

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕОДИМА В ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

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

¹ ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены», Новосибирск, Россия

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

³ ФГБУН ИВЭП СО РАН, Барнаул, Россия

Неодим занимает третье место по распространенности среди лантаноидов и является наиболее востребованным редкоземельным элементом в индустриальном секторе. Современные исследования выявили, что неодим, воздействуя на обменные процессы, может негативно сказываться на здоровье человека.

Цель работы – изучение содержания неодима в подземных и поверхностных водах Республики Алтай для оценки потенциального влияния на здоровье населения.

Материалы и методы. Для определения содержания неодима 170 проб воды (162 пробы подземных вод и 8 проб поверхностных вод), отобранных во всех муниципальных районах в 2013-2024 гг., были исследованы методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Для обработки результатов применялись стандартные статистические методы анализа.

Результаты. В подземных водных источниках естественный уровень содержания неодима составил $0,225 \pm 0,07$ мкг/дм³, при этом в воде 14 объектов средние концентрации неодима превышали фон. Максимальные концентрации в воде скважин достигали 8,2 мкг/дм³, а в воде родников – 0,98 мкг/дм³. Наиболее высокое содержание неодима (в 36,4 раза выше фоновой) отмечалось в воде из скважины, находящейся рядом с хвостохранилищем золотодобывающего предприятия. В поверхностных водах содержание неодима находилось в пределах 0,006-0,31 мкг/дм³, а самая высокая концентрация (0,31 мкг/дм³) обнаружена в воде реки Жумалы, протекающей мимо законсервированного молибден-вольфрамового рудника.

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. Горнодобывающие предприятия оказывают влияние на состояние водных объектов, что требует мониторингования последних. Концентрации неодима в 12,3% исследованных скважин хозяйственно-питьевого водоснабжения были выше фонового уровня. Ввиду возможной опасности неодима для здоровья важно разработать санитарно-гигиенические нормативы этого элемента для питьевых вод.

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

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., Савенко К.С., Новикова И.И. Экологические аспекты выявления неодима в подземных и поверхностных водах Республики Алтай. Медицина труда и экология человека. 2025; 4: 176 – 192.
doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-109>.

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

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF NEODYMIUM DETECTION IN GROUNDWATER AND SURFACE WATERS OF THE ALTAI REPUBLIC

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

¹ Novosibirsk Research Institute of Hygiene, Novosibirsk, Russia

² JSC «Altai-Geo», Gorno-Altai, Russia

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

Neodymium is the third most abundant lanthanide and the most sought-after rare earth element in industrial applications. Recent research has revealed that neodymium, by interfering with metabolic processes, can negatively impact human health.

The aim of this study was to investigate neodymium content in groundwater and surface water in the Altai Republic to assess its potential impact on public health.

Materials and Methods. To determine neodymium content, 170 water samples (162 groundwater samples and 8 surface water samples) collected in all municipal districts from 2013 to 2024 were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry. The results were analyzed using generally accepted statistical methods.

Results. The background concentration of neodymium in groundwater sources was $0.225 \pm 0.07 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, with average neodymium concentrations exceeding background levels in the water of 14 objects. Maximum concentrations in borehole water reached $8.2 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, while in spring water they reached $0.98 \mu\text{g}/\text{dm}^3$. The highest neodymium concentration (36.4 times higher than background levels) was observed in water from a well located near a gold mining tailings dam. In surface water, neodymium concentrations ranged from 0.006 to $0.31 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, with the highest concentration ($0.31 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) found in the Zhumaly River, which flows past a mothballed molybdenum-tungsten mine.

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 enterprises impact the health of water bodies, requiring monitoring of water sources. Neodymium concentrations in 12.3% of the tested drinking water wells were above background levels. Given the potential toxicity of neodymium, it is necessary to establish hygienic standards for drinking water.

Keywords: neodymium, concentrations, groundwater, surface water, mining, monitoring, rare earth elements (REE), human health, ecology

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., Savenko K.S., Novikova I.I. Environmental aspects of neodymium detection in groundwater and surface waters of the Altai Republic. Occupational Medicine and Human Ecology. 2025; 4: 176 – 192.

doi: doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-109>.

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

Неодим (Nd) является третьим по распространенности среди редкоземельных элементов (после церия и лантана) и лидирующим элементом по потребности в нем. Несмотря на открытие неодима в 1885 году, настоящий интерес к этому лантаноиду, относящемуся к группе легких РЗЭ, возник лишь спустя столетие. Это произошло благодаря разработке компаниями Hitachi и General Motors мощных магнитов на основе сплава неодима, железа и бора [1]. Сегодня неодимовые магниты нашли широчайшее применение – от высокоточных устройств в оборонной промышленности до элементов крепления в одежде. Помимо магнитов, неодим используется и в других областях. Незначительное добавление этого элемента в сталь или сплавы значительно повышает их прочность. Кроме того, неодим применяется в производстве стекла, а в сельском хозяйстве соединения Nd используются для обработки семян с целью повышения их всхожести [1, 2]. Вследствие роста добычи неодима и расширения областей его использования, в последнее время отмечается увеличение числа научных работ, рассматривающих отрицательное влияние Nd на здоровье людей и животных [3-5]. Исследования показали, что Nd, попадающий в организм с загрязненной водой, пищей, медицинскими препаратами [6], способен оказывать влияние на биологические процессы и метаболизм, вызывая различные заболевания [5-8].

Учитывая, что неодим чаще всего поступает в организм человека при употреблении питьевой воды [2, 9], проведение исследований по определению его содержания в подземных и поверхностных водах весьма актуально.

Цель работы – изучение содержания неодима в подземных и поверхностных водах Республики Алтай для оценки потенциального влияния неодима на здоровье населения.

Материалы и методы. Для исследования содержания неодима было отобрано 170 проб воды из 123 объектов, находящихся во всех районах Республики Алтай, в период с 2013 по 2024 годы. В их числе были 162 пробы подземных вод из 118 объектов (89 проб из 59 скважин, 73 пробы из 59 родников), а также 8 проб

поверхностных вод из 5 объектов (4 пробы из 2 рек, по 1 пробе из 2 озер, 2 пробы из 1 ручья). Кратность отбора проб на водных объектах составляла 1–3 пробы.

Исследование образцов воды проводилось в научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета методом масс-спектрометрии с *индуктивно связанной плазмой*.

Анализ протоколов исследований на наличие неодима в пробах воды и статистическую обработку сведений проводили с применением программы Microsoft Excel. В частности, представленные в работе фоновые значения неодима, рассчитывались как простое среднее арифметическое всех результатов опробования подземных вод (162 значения). В случаях значений ниже предела обнаружения, в соответствии с общепринятыми статистическими подходами в расчетах использовалась половина этого значения – $0,0025 \text{ мкг/дм}^3$. Погрешность среднего рассчитывалась как частное от деления стандартного отклонения набора данных на квадратный корень объема данных.

Результаты. Поскольку в Республике Алтай подземные воды являются основой хозяйственно-питьевого водоснабжения, 95,3% исследованных образцов были отобраны из подземных водоисточников. Анализ концентраций неодима в подземных водах на территории Республики Алтай выявил, что фоновый уровень содержания этого элемента составляет $0,225 \pm 0,07 \text{ мкг/дм}^3$, при этом концентрации на воде скважин варьировали от предела обнаружения ($<0,005 \text{ мкг/дм}^3$) до $8,2 \text{ мкг/дм}^3$, а в воде родников – от $<0,005 \text{ мкг/дм}^3$ до $0,98 \text{ мкг/дм}^3$ (рисунок).

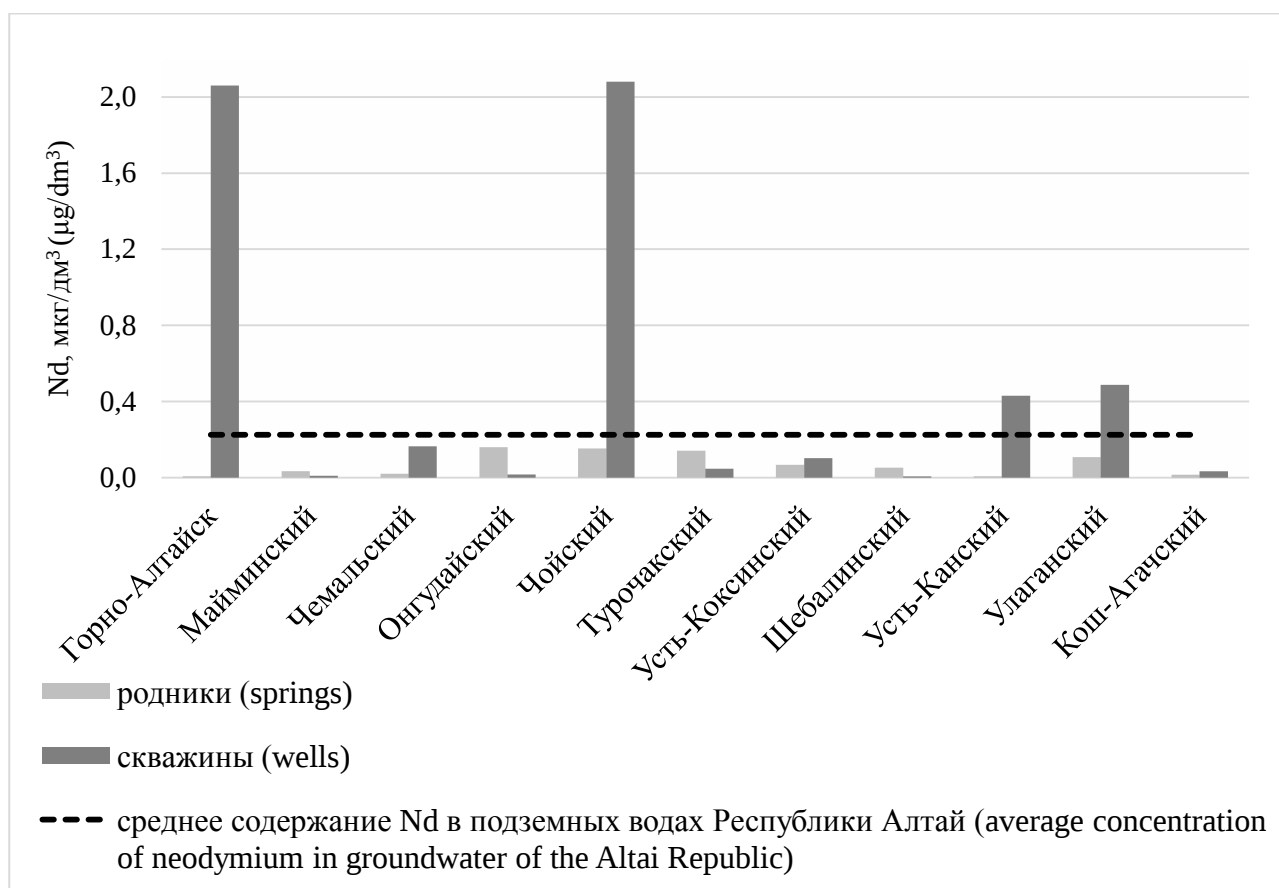


Рисунок. Сравнение средних концентраций неодима (мкг/дм³) в подземных водах скважин и родников в разрезе муниципальных районов Республики Алтай

Figure. Comparison of average neodymium concentrations (µg/dm³) in groundwater from wells and springs across municipal districts of the Altai Republic

Наибольшие средние значения концентрации неодима (2,08 мкг/дм³ и 2,06 мкг/дм³) были отмечены в воде двух наблюдательных скважинах. Одна из них располагается рядом с хвостохранилищем золотодобывающего предприятия «Рудник «Весёлый» в Чойском районе. Другая находится в городе Горно-Алтайске, на улице Северной, где после Алтайского землетрясения 2003 года заметно поменялся химический состав воды. Вода из этих скважин не предназначена для питья, её анализируют в рамках мониторинга в первом случае для оценки воздействия отходов горнодобывающего производства на загрязнение подземных вод (скважина около Рудника «Веселый»), во втором случае для наблюдения за изменениями физических и химических свойств воды в периоды повышения сейсмической активности (скважина наблюдательного пункта «Северный»). В этих же скважинах выявлены максимальные концентрации неодима в воде: так, в скважине Рудника «Веселый» в одной из проб концентрация Nd превышала средний уровень в 36,4 раза, а на улице Северной – в 29,7 раз. Всего на территории региона выявлено 14 объектов, где в подземных водах обнаружены аномальные значения неодима: 2 технические

скважины упомянутые выше и 12 объектов, вода которых используется населением для питья (таблица 1).

Таблица 1. Аномальные уровни содержания неодима ($\geq 0,225$ мкг/дм³) в подземных водах, установленные на территории Республики Алтай

Table 1. Abnormal levels of neodymium concentrations (≥ 0.225 µg/dm³) in groundwater established in the Altai Republic

№ п/п	Название объекта опробования	Кол-во проб на объекте	Содержание Неодима (мкг/дм ³)
1	Скважина вблизи хвостохранилища «Рудник «Весёлый» (Чойский район) – наблюдательная	4	0,007-8,20
2	Скважина по ул. Северная в г. Горно-Алтайске – наблюдательная	2	3,48-6,70
3	Скважина в с. Оро (Усть-Канский район)	1	3,30
4	Скважина в с. Паспарта (Улаганский район)	2	0,51-1,40
5	Скважина в с. Элекмонар (Чемальский район)	2	0,21-1,40
6	Скважина в с. Еланда (Чемальский район)	1	0,52
7	Скважина в с. Каяшкан (Турочакский район)	1	0,34
8	Скважина в с. Абай (Усть-Коксинский район)	1	0,33
9	Скважина в с. Жана-Аул (Кош-Агачский район)	1	0,33
10	Родник в с. Кара-Коба (Онгудайский район)	1	0,98
11	Родник "Маячный" в с. Турочак	1	0,36
12	Громатухинский родник в с. Усть-Кокса	1	0,36
13	Родник в с. Сухой Карасук (Чойский район)	1	0,30
14	Родник в с. Язула (Улаганский район)	1	0,30

В целом аномальные концентрации неодима содержали 12,3% скважин, относящихся хозяйственно-питьевому водоснабжению (7 из 57 обследованных), и 8,4% родников (5 из 59 обследованных).

Обращает внимание скважина в с. Оро Усть-Канского района, где содержание неодима (3,30 мкг/дм³) в 14,6 раз превышает средние концентрации этого элемента для региона. Ввиду небольшого количества отобранных проб на объектах с аномальными уровнями содержания неодима (1-3 пробы) необходимо проведение дополнительных исследований в этом направлении, в том числе с целью изучения

влияния неодима на здоровье людей, использующих воду с повышенными концентрациями Nd.

При выборочном исследовании поверхностных вод наиболее высокие концентрации (0,31-0,52 мкг/дм³) неодима отмечались в воде реки Жумалы Кош-Агачского района, притоки которой протекают мимо законсервированного Калгутинского рудника (где в 1937-1950 гг. и 2003-2008 гг. добывались вольфрамовые и молибденовые руды). Промзона рудника, где остались невывезенные отходы производства (0,1 млн т), находится в труднодоступной местности на высоте 3100 м над уровнем моря, но, несмотря на длительное отсутствие деятельности, отходы оказывают влияние на химический состав близлежащей реки Жумалы (таблица 2).

Таблица 2. Содержание неодима в исследованных реках и озёрах на территории Республики Алтай (мкг/дм³)

Table 2. Neodymium concentrations in the studied rivers and lakes in the Altai Republic (μg/dm³)

№ п/п	Название объекта опробования	Кол-во проб на объекте	Уровни содержания
1	р. Жумалы (Кош-Агачский район)	3	0,310-0,520
2	р. Калгуты (Кош-Агачский район)	1	0,096
3	Ручей в промзоне рудника «Весёлый» (Чойский район)	2	0,025-0,041
4	оз. Манжерокское (Майминский район)	1	0,260
5	оз. Гейзерное (Улаганский район)	1	0,006

Полученные данные по уровням содержания неодима в выборочно исследованных реках и озёрах также свидетельствуют о необходимости проведения дополнительных исследований как уже представленных объектов (табл. 2), так и в целом поверхностных вод на территории Республики Алтай.

Таким образом, установленные концентрации неодима в подземных водах республики значительно варьируют в пространстве. Аномально высокое содержание этого редкоземельного элемента выявлено в 14 источниках подземных вод, при этом на 12 объектах (в 7 скважинах и 5 родниках) вода используется в питьевых целях. Необходимо продолжить изучение распределения неодима и

других РЗЭ в подземных питьевых водах Республики Алтай, особенно на объектах, обеспечивающих водой значительную часть населения.

Обсуждение. Изучение содержания РЗЭ в природных средах активно началось только в последние годы. Публикации о выявлении неодима в поверхностных и подземных водах Сибири (на юго-востоке Забайкальского края [10], в бассейне реки Оби – в Красноярском крае, Кемеровской области, Новосибирской области, Алтайском крае [11], Томской области [11, 12], Республике Алтай [11, 13], Хакасии [14] показали, что среднее значение этого элемента в поверхностных водах составляло 0,002-0,29 мкг/дм³, в подземных водах – 0,002-0,52 мкг/дм³, в тех случаях, если на исследуемых территориях отсутствовали горнодобывающие предприятия. Однако вблизи техногенных загрязнителей концентрации Nd были намного выше: в поровых водах хвостохранилищ Бом-Горхонского горно-обогатительного комбината (ГОК) – 661 мкг/дм³, Джидинского ГОК – 394 мкг/дм³ [15]; а в водах из дренажных стоков хвостохранилища Орловского месторождения тантала – 761 мкг/дм³ [16]. В нашем исследовании наиболее высокое содержание Nd было выявлено также в скважине, находящейся рядом с горнодобывающим предприятием («Рудник «Веселый») – 8,2 мкг/дм³, то есть в 36,4 раза выше фоновой концентрации для подземных вод Республики Алтай.

Публикации российских и зарубежных ученых доказывают, что концентрации РЗЭ (в том числе неодима) в поверхностных и подземных водах зависят от минералов водовмещающих пород [17, 18], а также могут быть связаны с антропогенными загрязнениями, которые возникают при добыче полезных ископаемых или при попадании промышленных и сельскохозяйственных отходов [2].

Учитывая стойкость РЗЭ в окружающей среде и возможность водного пути поступления, возникает необходимость изучения их воздействия на организм человека. В последнее десятилетие выяснилось, что РЗЭ разрушают структуру и функцию различных органов человека и вызывает мультисистемные заболевания (дыхательной, нервной, сердечно-сосудистой, репродуктивной и иммунной систем) [6].

Установлено, что неодим обладает цитотоксичным действием, может повреждать ДНК и способствовать аномальному развитию сердечно-сосудистой системы [8]. При беременности неодим влияет на внутриутробное развитие плода, приводя к дефектам нервной трубки плода [7] и увеличивая риск появления аномалий, например, *врожденных пороков развития лица и челюстей* у младенцев [19]. Неодим нарушает костный метаболизм, что приводит к снижению минеральной плотности

костной ткани, вызывая остеопороз и повреждение костей и суставов [20]. При постоянном контакте с неодимом этот элемент накапливается в организме людей: китайскими исследователями было показано, что содержание Nd в волосах шахтеров было намного выше, чем в волосах людей из контрольной группы [21]. Пыль, содержащая оксид неодима Nd_2O_3 , способна вызывать пневмонию и легочный фиброз [22, 23], а также повреждать мужские репродуктивные органы, вызывая снижение качества спермы [24].

Все эти факты, ярко свидетельствующие о токсичности неодима определяют необходимость нормирования этого элемента в природных средах, в том числе в подземных водах, так как в утвержденных ныне санитарных правилах СанПиН 1.2.3685-21²² гигиенические стандарты для неодима отсутствуют. В других странах нормы для концентраций неодима в подземных водах пока также не введены [2].

Ограничения исследования. Работа проведена на территории одного региона и с небольшим количеством отобранных проб на водных объектах (по 1-3 пробы воды из каждого объекта), что может ограничивать обобщенность выводов.

Заключение. Исследование показало широкое распространение неодима в воде на территории Республики Алтай. Фоновое содержание неодима в подземных водах Республики Алтай составило $0,225 \pm 0,07$ мкг/дм³, при этом концентрации в водных объектах варьировали от предела обнаружения ($<0,005$ мкг/дм³) до $8,2$ мкг/дм³.

Среди подземных вод наиболее высокое содержание Nd выявлено в наблюдательной скважине, находящейся рядом с хвостохранилищем золотодобывающего предприятия «Рудник «Веселый» ($0,007$ - $8,2$ мкг/дм³), а среди поверхностных вод – в воде реки, протекающей около законсервированного Калгутинского молибден-вольфрамового рудника ($0,310$ - $0,520$ мкг/дм³). Необходимо продолжить исследования концентрации неодима в отвалах горнодобывающей промышленности, чтобы оценить рентабельность его повторного использования. Также важно организовать мониторинг водных объектов, находящихся вблизи горнодобывающих предприятий.

Из 118 исследованных скважин и родников в воде 14 объектов (11,8%) концентрации неодима превышали средний уровень по региону. При этом вода из 12 водоисточников аномальных по неодиму (12,3% скважин и 8,5% родников), используется населением для питья. Ввиду возможного вредного воздействия

²² СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"

неодима, требуется установить санитарные нормы его содержания в естественных средах, включая питьевую воду. Целесообразно расширить исследование по выявлению неодима (и прочих РЗЭ) в подземных водоисточниках.

Кроме того, следует изучить состояние здоровья людей, употребляющих воду из уже установленных скважин с аномально высоким содержанием неодима.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования – Щучинов Л.В.

Сбор и обработка материала – Кац В.Е., Савенко К.С.

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

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 –

Data analysis – Shchuchinov L.V., Katz V.E., 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. Кондратьев В.Б. Глобальный рынок редкоземельных металлов. Горная промышленность. 2017;4:48-54.
2. 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>
3. Balaram V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. Geoscience Frontiers. 2019;10:1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
4. Dai L., Ge J., Wang L., Wan X., Guo G., Liang T., et al. Hair-biomonitoring assessment of rare-earth-element exposure in residents of the largest rare-earth mining and smelting

- area of China. *Environment International*. 2023;179:108177. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108177>
5. Brouziotis A.A., Giarra A., Libralato G., Pagano G., Guida M., Trifuoggi M. Toxicity of rare earth elements: an overview on human health impact. *Frontiers of Environmental Science*. 2022;10:948041. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948041>
6. Wang W., Yang Y., Wang D., Huang L. Toxic Effects of Rare Earth Elements on Human Health: A Review. *Toxics*. 2024; 12: 317. <https://doi.org/10.3390/toxics12050317>
7. Wei J., Wang C., Yin S., Pi X., Jin L., Li Z., Liu J., Wang L., Yin C., Ren A. Concentrations of rare earth elements in maternal serum during pregnancy and risk for fetal neural tube defects. *Environment International*. 2020;137:105542. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105542>
8. Chen Y., Zhu W., Shu F., Fan Y., Yang N., Wu T., Ji L., Xie W., Bade R., Jiang S., et al. Nd₂O₃ Nanoparticles Induce Toxicity and Cardiac/Cerebrovascular Abnormality in Zebrafish Embryos via the Apoptosis Pathway. *Int. J. Nanomed*. 2020;15:387-400. <https://doi.org/2147/IJN.S220785>
9. Gwenzi W., Mangori L., Danha C., et al. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. *Science of The Total Environment*. 2018;636:299-313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.235>
10. 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>
11. 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>
12. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Максимова А.А., Николенко О.Д., Деркачев А.С., Фомина (Садыкова) Я.В., Хвощевская 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>
13. 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>

14. 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.
15. 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>
16. 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>
17. 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.
18. Харитоновна Н.А., Соколовская М.А., Барановская Е.И., Челноков Г.А., Карабцов А.А., Чернощев Л.Н., Брагин И.В. Микроэлементы в термальных водах северного Тянь-Шаня: распределение и механизмы накопления. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024;4:70-86. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-70-86>
19. Liu L., Wang L., Ni W., Pan Y., Chen Y., Xie Q., et al. Rare Earth elements in umbilical cord and risk for orofacial clefts. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2021;207:111284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111284>
20. Liu H., Liu H., Yang Z., Wang K. Bone Mineral Density in Population Long-Term Exposed to Rare Earth Elements from a Mining Area of China. Biol. Trace Elem. Res. 2021;199:453-464. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02165-0>
21. Wei B., Li Y., Li H., Yu J., Ye B., Liang T. Rare Earth elements in human hair from a mining area of China. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013;96:118-123. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.05.031>
22. Shi X.M., Bai Y.C., Gao Y.R., Bu N., Song H.Y., Huang L.H., Zhao Y.H., Wang S.H. Comprehensive Analysis of Differentially Expressed lncRNAs miRNAs and mRNA and Their ceRNA Network of Patients with Rare-Earth Pneumoconiosis. Front. Genet. 2021;12:700398. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.700398>
23. Huang L.H., Yang H., Su X., Gao Y.R., Xue H.N., Wang S.H. Neodymium Oxide Induces Cytotoxicity and Activates NF-kappaB and Caspase-3 in NR8383 Cells. Biomed. Environ. Sci. 2017;30:75-78. <https://doi.org/10.3967/bes2017.010>
24. Wang S., Bu N., Yun Y., Shi X., Wang S., Gao Y. RNA-Seq Analysis of Testes from Mice Exposed to Neodymium Oxide. Toxics. 2023;11:952. <https://doi.org/10.3390/toxics11120952>

References:

1. Kondratev V.B. Overview of the global rare earth metals market. *Gornaya promyshlennost*. 2017;4:48-54. (In Russ.)
2. 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>
3. Balaram V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. *Geoscience Frontiers*. 2019;10:1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
4. Dai L., Ge J., Wang L., Wan X., Guo G., Liang T., et al. Hair-biomonitoring assessment of rare-earth-element exposure in residents of the largest rare-earth mining and smelting area of China. *Environment International*. 2023;179:108177. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108177>
5. Brouziotis A.A., Giarra A., Libralato G., Pagano G., Guida M., Trifuoggi M. Toxicity of rare earth elements: an overview on human health impact. *Frontiers of Environmental Science*. 2022;10:948041. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948041>
6. Wang W., Yang Y., Wang D., Huang L. Toxic Effects of Rare Earth Elements on Human Health: A Review. *Toxics*. 2024;12:317. <https://doi.org/10.3390/toxics12050317>
7. Wei J., Wang C., Yin S., Pi X., Jin L., Li Z., Liu J., Wang L., Yin C., Ren A. Concentrations of rare earth elements in maternal serum during pregnancy and risk for fetal neural tube defects. *Environ. Int.* 2020;137:105542. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105542>
8. Chen Y., Zhu W., Shu F., Fan Y., Yang N., Wu T., Ji L., Xie W., Bade R., Jiang S., et al. Nd₂O₃ Nanoparticles Induce Toxicity and Cardiac/Cerebrovascular Abnormality in Zebrafish Embryos via the Apoptosis Pathway. *Int. J. Nanomed.* 2020;15:387-400. <https://doi.org/10.2147/IJN.S220785>
9. Gwenzi W., Mangori L., Danha C., et al. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. *Science of The Total Environment*. 2018;636:299-313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.235>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. 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>
14. 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.)
15. 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>
16. 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>
17. 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.
18. Kharitonova N.A., Sokolovskaya M.A., Baranovskaya E.I., Chelnokov G.A., Karabtsov A.A., Chernoshchekov L.N., Bragin I.V. Trace elements in thermal waters of the northern Tien Shan: distribution and fate. Moscow University Geol. Bull. 2024; 4:70–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-70-86>
19. Liu L., Wang L., Ni W., Pan Y., Chen Y., Xie Q., et al. Rare Earth elements in umbilical cord and risk for orofacial clefts. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2021;207: 111284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111284>
20. Liu H., Liu H., Yang Z., Wang K. Bone Mineral Density in Population Long-Term Exposed to Rare Earth Elements from a Mining Area of China. Biol. Trace Elem. Res. 2021;199:453–464. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02165-0>
21. Wei B., Li Y., Li H., Yu J., Ye B., Liang T. Rare Earth elements in human hair from a mining area of China. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013;96:118-123. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.05.031>

22. Shi X.M., Bai Y.C., Gao Y.R., Bu N., Song H.Y., Huang L.H., Zhao Y.H., Wang S.H. Comprehensive Analysis of Differentially Expressed lncRNAs miRNAs and mRNA and Their ceRNA Network of Patients with Rare-Earth Pneumoconiosis. *Front. Genet.* 2021;12:700398. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.700398>
23. Huang L.H., Yang H., Su X., Gao Y.R., Xue H.N., Wang S.H. Neodymium Oxide Induces Cytotoxicity and Activates NF-kappaB and Caspase-3 in NR8383 Cells. *Biomed. Environ. Sci.* 2017;30:75-78. <https://doi.org/10.3967/bes2017.010>
24. Wang S., Bu N., Yun Y., Shi X., Wang S., Gao Y. RNA-Seq Analysis of Testes from Mice Exposed to Neodymium Oxide. *Toxics.* 2023;11:952. <https://doi.org/10.3390/toxics11120952>

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

Савенко Ксения Сергеевна – научный сотрудник ФГБУН Институт 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

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: 18.11.2025

Принята в печать/Accepted 26.11.2025