

УДК 556.314

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИСУТСТВИЕМ ИТТРИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

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

¹ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены», г. Новосибирск, Россия

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

³ФГБУН ИВЭП СО РАН, г. Барнаул, Россия

Тема редкоземельных элементов (РЗЭ), к которым относится иттрий, сейчас очень актуальна из-за их широкого использования в высокотехнологичных областях промышленности. Долгое время считалось, что РЗЭ биологически нейтральны, но анализ отечественных и зарубежных статей показывает, что иттрий способен оказывать токсическое действие на организм человека, поэтому необходимо изучение распространенности этого элемента в жизненно важных средах, в том числе питьевой воде. В Республике Алтай содержание иттрия в подземных водах, являющимися источниками хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, изучено недостаточно.

Цель работы – исследование концентраций иттрия в подземных водах Республики Алтай и экологическая оценка полученных результатов.

Материалы и методы. Подземные воды отбирали в 2013-2018, 2024 годах во всех 10 районах Республики Алтай и в городе Горно-Алтайске. Всего было исследовано на иттрий методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) 173 пробы воды (по 1-3 пробы из 60 скважин, 5 колодцев и 60 родников). Анализ протоколов этих исследований проводили с использованием программы Microsoft Excel для графических построений и выявления корреляционных связей содержания иттрия с другими химическими показателями состава воды.

Результаты. Установлено, что региональный фон иттрия для подземных вод Республики Алтай, составляет $0,26 \pm 0,065$ мкг/дм³. При этом на 9 объектах максимальные концентрации иттрия были выше среднего значения в 2 и более раз. Наиболее высокое содержание иттрия ($6,60$ мкг/дм³) отмечалось в пробе воды, отобранной из скважины, расположенной у подножия дамбы хвостохранилища золотоизвлекательной фабрики. Выявлены статистически значимые корреляционные связи концентраций иттрия с общей минерализацией и

жёсткостью воды, pH, содержанием сульфатов и гидрокарбонатов.

Заключение. Таким образом, установлено, что фоновое содержание иттрия в подземных водах Республики Алтай составляет $0,26 \pm 0,065$ мкг/дм³, но на 9 объектах оно превышало этот уровень в 2-24 раза, что может влиять на здоровье населения. Проблемным вопросом остается отсутствие нормирования иттрия в питьевых водах.

Ключевые слова: итрий, редкоземельные элементы (РЗЭ), концентрации, подземные воды, мониторинг, здоровье человека, экология, Республика Алтай.

Для цитирования: Щучинов Л.В., Кац В.Е., Савенко К.С., Новикова И.И. Потенциальные экологические проблемы, связанные с присутствием иттрия в подземных водах Республики Алтай. Медицина труда и экология человека. 2025; 2: 97-110.

Для корреспонденции: Щучинов Леонид Васильевич, к.м.н., ведущий научный сотрудник ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора, e-mail: leo2106@mail.ru.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10206>

POTENTIAL ENVIRONMENTAL PROBLEMS ASSOCIATED WITH THE PRESENCE OF YTTRIUM IN GROUNDWATER IN THE ALTAI REPUBLIC

Shchuchinov L.V.¹, Kats V.E.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

The topic of rare earth elements (REE), which include yttrium, is currently very relevant due to their widespread use in high-tech industries. The range of REE applications is growing, and the frequency of human contact with them is expected to increase. For a long time, it was believed that REE are biologically neutral, but an analysis of domestic and foreign articles shows that yttrium can have a toxic effect on the human body, so it

is necessary to study the prevalence of this element in vital environments, including drinking water. In the Altai Republic, the concentration of yttrium in groundwater, which is the source of domestic and drinking water supply for the population, has not been sufficiently studied.

The aim of the work is to study the concentrations of yttrium in groundwater of the Altai Republic and an environmental assessment of the results obtained.

Material and methods. A total of 173 water samples (1-3 samples from 60 boreholes, 5 wells and 60 springs) were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The protocols of these studies were analyzed using Microsoft Excel to determine the minimum, maximum and average concentrations of yttrium, to plot graphs and identify correlations between yttrium and other chemical parameters of the water.

Results. It was found that the regional background of yttrium for groundwater in the Altai Republic is $0.26 \pm 0.065 \mu\text{g}/\text{dm}^3$. At 9 objects the maximum yttrium concentrations were higher than the average value by 2 or more times. The highest yttrium level ($6.60 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) was noted in a water sample taken from a borehole located next to a waste storage facility for a gold extraction plant. Statistically significant correlations were revealed between yttrium concentrations and total mineralization and water hardness, pH, sulfate concentration and hydrocarbonate concentration.

Conclusion. Thus, it was established that the background concentration of yttrium in the underground waters of the Altai Republic is $0.26 \pm 0.065 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, but at 9 sites it exceeded this level by 2-24 times, which can affect the health of the population. The lack of standardization of yttrium in drinking water remains a problematic issue.

Keywords: yttrium, rare earth elements (REE), concentrations, groundwater, monitoring, human health, ecology, monitoring, the Altai Republic.

For citation: Shchuchinov L.V., Katz V.E., Savenko K.S., Novikova I.I. Potential environmental problems associated with the presence of yttrium in the groundwater of the Altai Republic. *Occupational Medicine and Human Ecology*. 2025; 2: 97–110.

Correspondence: Shchuchinov Leonid Vasilievich, Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher at the Federal Budgetary Scientific Institution «Novosibirsk Research Institute of Hygiene» of Rospotrebnadzor, e-mail: leo2106@mail.ru.

Funding: the study had no financial support.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10206>

Тема редкоземельных элементов (РЗЭ) сейчас очень актуальна из-за их широкого использования в высокотехнологичных областях промышленности. В условиях современной политической нестабильности РЗЭ стали относиться к критически важному сырью, обеспечивающему национальную безопасность страны, поэтому в большинстве научных публикаций обсуждается распространенность мировой и отечественной минерально-сырьевой базы, предлагаются новые методы добычи и переработки РЗЭ, описываются области применения этих элементов. Объемы использования РЗЭ растут, не только в промышленности, но и в быту, так как они входят в состав смартфонов, компьютеров, телевизоров, энергосберегающих лампочек и автомобилей, однако экологические аспекты до настоящего времени изучены мало, в частности, недостаточно сведений о содержании РЗЭ в жизненно важных средах (в том числе в питьевой воде) [1] и о влиянии отдельных элементов на здоровье человека [2]. Среди 17 редкоземельных элементов иттрий (Y) стоит обособленно: он (как и скандий) не входит в группу лантаноидов, состоящих из 15 элементов, и имеет от них отличия, как в физико-химических свойствах, так и в биологическом воздействии. Если до недавнего времени РЗЭ считались биологически нейтральными, то на токсичность иттрия для живых организмов российские и зарубежные ученые обратили внимание уже давно [3, 4]. Присутствие иттрия в питьевой воде может влиять на его накопление в организме человека [5, 6]. В Республике Алтай основой хозяйственно-питьевого водоснабжения населения являются подземные воды, однако содержание иттрия в них практически не изучалось, что и определило выбор нашего исследования.

Цель работы – исследование концентраций иттрия в подземных водах Республики Алтай и экологическая оценка полученных результатов.

Материалы и методы. Пробы подземных вод отбирали в рамках Государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) и при специальных гидрогеохимических исследованиях родников Горного Алтая в 2013-2018, 2024 годах. Работу проводили во всех 10 районах Республики Алтай и в городе Горно-Алтайске. Всего было отобрано 173 пробы (по 1-3 пробы из 60 скважин, 5 колодцев и 60 родников). Анализ проводился в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета, содержание иттрия определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) с помощью масс-спектрометра NexION 300D. Статистический анализ данных проводился в программе Microsoft Excel, определяли минимальные, максимальные, средние концентрации иттрия и уровни погрешности, а также делали корреляционный анализ и графические построения.

Результаты. Исследование показало, что из 173 проанализированных проб (89 проб из скважин, 7 из колодцев и 77 из родников) концентрации иттрия были ниже порога обнаружения ($<0,010$ мкг/дм³) в 11 из них (6,3%). В остальных 162 пробах (93,7%) концентрации иттрия варьировали от 0,010 мкг/дм³ до 6,60 мкг/дм³, при среднем (фоновом) значении $0,26 \pm 0,065$ мкг/дм³. На 9 водных объектах (7,2%) содержание иттрия составляло более 0,5 мкг/дм³, что в 2 и более раз выше фонового уровня (табл.).

Таблица. Подземные водоисточники Республики Алтай с максимальным содержанием иттрия более 0,5 мкг/дм³.

Table. Groundwater sources of the Altai Republic with maximum yttrium concentrations exceeding 0.5 µg/dm³.

П/П	Населенный пункт, район	Место нахождения	Тип водоисточника	Концентрации иттрия мкг/ дм ³
1	г. Горно-Алтайск	ул. Северная	трубчатый колодец	3,5-5,4
2	с. Сейка, Чойский	рудник «Веселый»	наблюдательная скважина	0,02-6,60
3	с. Элекмонар, Чемальский	ул. Береговая, 20	скважина	0,57-1,90
4	с. Элекмонар, Чемальский	ул. Советская, 21	скважина	0,49-0,52
5	с. Кара Кобы Онгудайский	родник в Широком Логу	родник	0,73
6	с. Турочак, Турочакский	родник «Маячный»	родник	0,60
7	с. Оро, Усть-Канский	школа	скважина	2,60
8	с. Балыкча, Улаганский	больница	трубчатый колодец	2,60
9	с. Паспарта, Улаганский	школа	скважина	2,0-5,2

Из перечисленных источников подземных вод только два не используются населением для питьевых целей – трубчатый колодец в г. Горно-Алтайске по улице Северная и наблюдательная скважина на руднике «Весёлый» рядом с хвостохранилищем – местом хранения отходов горной добычи.

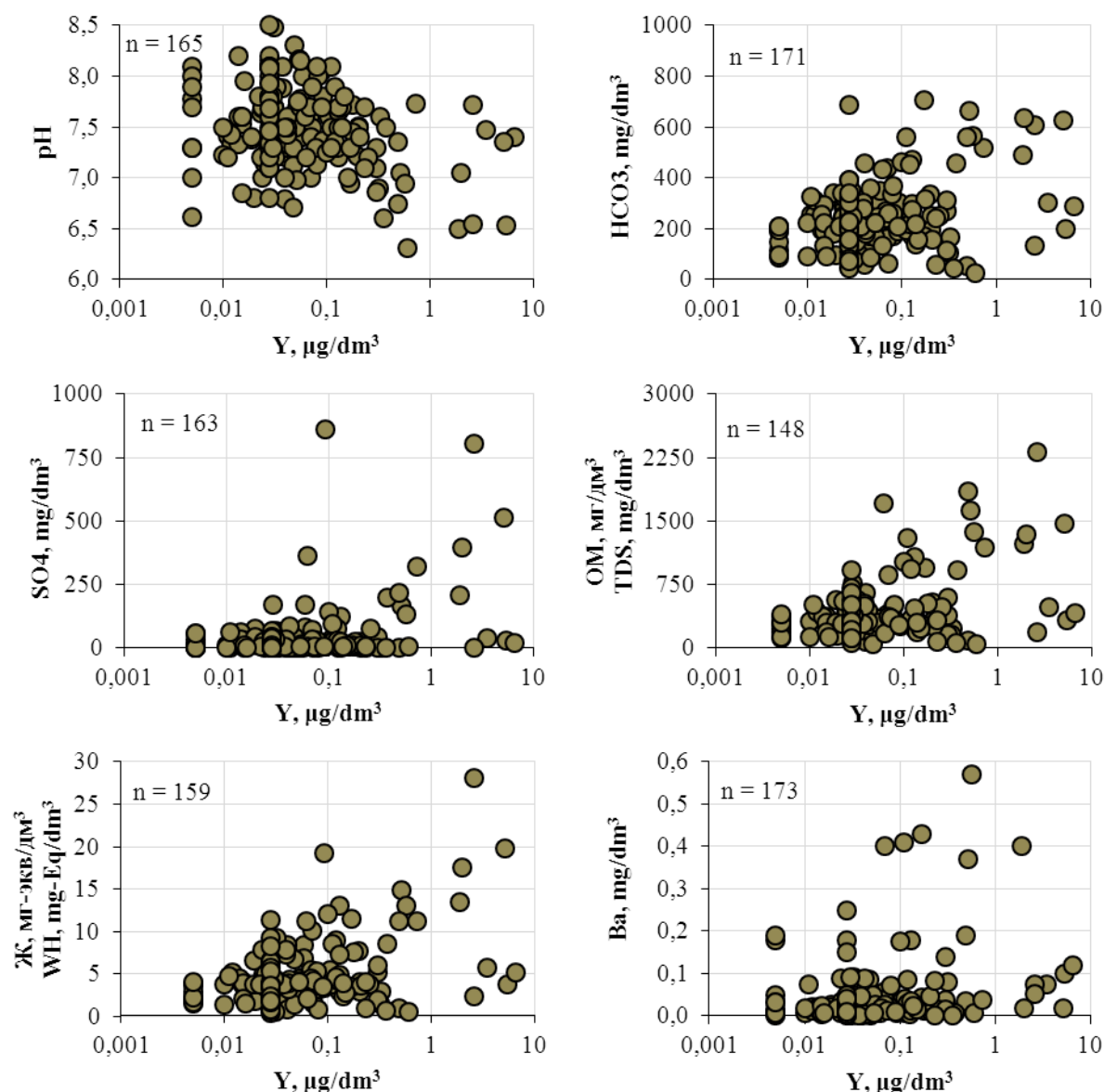
Максимальная концентрация иттрия (6,60 мкг/дм³) установлена в пробе, отобранной из скважины, расположенной у подножия дамбы (ниже по рельефу)

хвостохранилища золотоизвлекательной фабрики АО «Рудник» Весёлый». Этот результат был вполне ожидаемым, так как извлечение золота из медно-колчеданных руд приводит к загрязнению почвы РЗЭ при выносе на поверхность и переработке глубоких пород [7]. Обнаружение иттрия в воде этой скважины может говорить о его нахождении также в почве и отвалах горных пород.

Интересен и второй объект с высоким содержанием иттрия (до 5,4 мкг/дм³) – горно-алтайский трубчатый колодец (Государственный наблюдательный пункт состояния подземных вод – ГНС «Северный»), где после крупного Алтайского (Чуйского) землетрясения (2003 г.) было выявлено повышение температуры подземных вод с 7°C до 32°C, причем косейсмические геотермические реакции отмечаются до настоящего времени [8]. Вполне вероятно, что изменение температурного режима при сейсмической активации обусловлено подъемом глубинных термальных вод, обогащенных РЗЭ, в том числе иттрием.

На третьем месте среди объектов с высоким содержанием иттрия (до 5,2 мкг/дм³) является вода из школьной скважины в селе Паспарта Улаганского района, где повышенные концентрации иттрия обусловлены, как и в остальных источниках питьевого водоснабжения, естественной причиной – присутствием РЗЭ в водовмещающих породах.

Согласно литературным данным накопление иттрия в воде ограничивается плохой растворимостью его соединений (гидрокарбонатные, фосфатные, сульфатные и др.) в среде с повышенными значениями pH [9], при проведении корреляционного анализа нами были выявлены сходные закономерности (рис.).



Примечание: Ж – жесткость общая; OM – общая минерализация; n – количество проб

Рисунок 1. Графики взаимосвязей концентраций иттрия с показателями химического состава подземных вод Республики Алтай.

Figure 1. Graphs of the relationships between yttrium concentrations and chemical composition parameters of groundwater in the Altai Republic.

Выявлены статистически значимые корреляционные связи концентраций иттрия с содержанием в подземных водах сульфатов, их общей минерализацией и жёсткостью (при уровне значимости 99,9%), значениями pH и содержанием гидрокарбонатов (99%). Для всех показателей (кроме pH) характерны положительные значения коэффициента корреляции, т.е. предварительно можно говорить, что концентрации иттрия в подземных водах Республики Алтай происходит по мере увеличения их общей минерализации, жёсткости и роста

концентраций соединений, участвующих в миграции иттрия, а также смещения реакции водной среды от слабощелочной в сторону нейтральной и слабокислой. Кроме того, выявлена статистически значимая положительная связь (на уровне 90%) между повышенными концентрациями иттрия и бария. Данный аспект и в целом изучение особенностей накопления всех РЗЭ на территории Республики Алтай не только в природных средах, но и в тканях и органах людей, употребляющих воду с повышенным их содержанием, еще требует проведения дальнейших детальных исследований.

Обсуждение. Анализ немногочисленных публикаций по изучению РЗЭ в поверхностных и подземных водах Республики Алтай показал, что содержание иттрия в водоисточниках различается незначительно, не превышая 0,052 мкг/дм³. Так, в бассейне реки Кучерла Усть-Коксинского района концентрация иттрия в поверхностной воде была не выше 0,05 мкг/дм³ [10], в Телецком озере – 0,052 мкг/дм³, а в родниках в окрестностях Джумалинского термального источника варьировала в пределах 0,016-0,05 мкг/дм³ [11]. В нашем исследовании, куда входили более глубокие водные объекты, средняя концентрация была в 5 раз выше – 0,26 мкг/дм³, особенно в случаях исследования воды из скважин. Данные о кларках иттрия для подземных вод в научной литературе отсутствуют, для морских и речных вод они составляют соответственно – 0,3 и 0,04 мкг/дм³.

По литературным данным известно, что для человеческого организма контакт с иттрием, особенно длительный, может вызвать проблемы со здоровьем. В работах российских и зарубежных ученых было показано, что хроническое поступление в организм иттрия, даже в небольших дозах, способно вызывать деструктивные изменения в органах ЖКТ [3, 12], печени и почках [13]. В частности, было выявлено, что этот элемент способствует повреждению печени с воспалением, некрозом и портальным фиброзом [14]. Показано также, что вдыхание пыли, содержащей иттрий, может привести к кашлю и одышке, отеку легких, а при длительном воздействии – к развитию пневмокониоза [15]. Кроме того, при хроническом поступлении в организм иттрий откладывается в костях, что снижает их плотность из-за замещения иттрием кальция и нарушает метаболизм, приводящий к остеопорозу и травмам костей и суставов [16]. Выявлено также, что YCl₃ пагубно воздействует на слизистую оболочку глаз, а также способен вызвать повреждение яичек за счет стимуляции апоптоза клеток [17]. У людей, живущих в районах, с повышенным содержанием РЗЭ, их накопление (в том числе иттрия) было обнаружено в крови, моче и волосах [18, 19]. Не исключено поступление иттрия при приеме препаратов (он входит в состав некоторых онкологических

медикаментов) [13]. Таким образом, иттрий (как и другие редкоземельные элементы) может попадать в организм человека разными путями (через кожу, дыхательные пути, желудочно-кишечный тракт) и накапливаться в различных тканях или органах, представляя угрозу для здоровья человека [13-18, 20].

Между тем, в настоящее время иттрий находит всё более широкое применение в промышленности и электронике. Сплавы с иттрием из-за прочности и огнеупорных свойств используются в авиакосмической промышленности, атомной технике, автомобилестроении. В России, Китае, США иттрий и другие РЗЭ в последние годы отнесены к стратегически важному сырью, поэтому ожидается рост их добычи и переработки, что может повлечь увеличение профессиональных контактов с этими элементами и загрязнение окружающей среды отходами горнодобывающих предприятий, как это уже происходит в Китае, который лидирует в мире по добыче РЗЭ [1, 19, 20].

Не случайно первые попытки нормирования РЗЭ для снижения риска токсического влияния были предприняты именно китайскими учеными, которые предложили допустимую суточную суммарную дозу в 70 мкг/кг массы тела (или 4,9 мг в день, учитывая взрослого человека весом 70 кг) которая была определена в ходе исследования здоровья людей, проживающих в районах добычи РЗЭ, а также при экспериментах на животных [21-24].

Что касается нормирования иттрия в окружающей среде, то стандарты содержания этого элемента в воде, воздухе, пищевых продуктах в России (да и в мире в целом) пока отсутствуют. Единственным исключением является Канада, где недавно были разработаны федеральные рекомендации по качеству воды для редкоземельных элементов [25], в которых представлены нормы для церия, лантана, неодима и иттрия [6]. В Российской Федерации для подземных вод установлены ориентировочно допустимые уровни только для соединений самария (SmCl_3) – 24 мкг/дм³ и европия (Eu_2O_3) – 300 мкг/дм³ (СанПиН 1.2.3685-21), т. е. допустимые концентрации для иттрия не определены.

Заключение. В работе показано, что содержание иттрия в подземных водах Республики Алтай варьирует в пределах 0,010-6,60 мкг/дм³. Региональный фон этого элемента для подземных вод Республики Алтай, исходя из проведенных исследований, определен на уровне 0,26 мкг/дм³.

Выявлено 9 объектов с повышенным уровнем иттрия, из которых 7 объектов используются для питьевого водоснабжения населения (с максимальными концентрациями иттрия 0,6-5,4 мкг/дм³, т.е. в 2-19 раз выше фоновых значений). Наиболее высокое содержание иттрия (6,60 мкг/дм³) выявлено в воде из

наблюдательной скважины, не использующейся для питьевых целей и находящейся рядом с хвостохранилищем золотодобывающего предприятия, что требует последующих исследований переработанных руд на предмет определения возможности вторичной переработки отходов этого рудника для извлечения иттрия (и других РЗЭ).

Установлены статистически значимые (на уровне 99%) корреляционные связи концентраций иттрия с общей минерализацией и жёсткостью и pH воды, а также с содержанием в ней сульфатов и гидрокарбонатов.

Ввиду имеющихся подтвержденных научных данных о негативном влиянии иттрия на здоровье человека, особенно при его хроническом поступлении в организм, например, с питьевой водой, полученные результаты по подземным водам Республики Алтай говорят о потенциальных экологических проблемах, требующих их дальнейшего изучения. В частности, представляется вероятной возможность влияния на здоровье населения подземных вод, используемых для питьевых целей в тех населенных пунктах, где были обнаружены высокие концентрации РЗЭ – в селах Сейка, Элекмонар, Турочак, Паспарта, Балыкча.

Учитывая токсичность иттрия, проблемным вопросом остается отсутствие его нормирования в питьевых водах.

Список литературы:

1. Balaram V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. *Geoscience Frontiers*. 2019; 10 (4): 1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.
2. Rim K., Koo K., Park J. Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: A literature review. *Safety and Health Work*. 2013; 4: 12-26. <https://doi.org/10.5491/SHAW.2013.4.1.12>.
3. Левина Э.Н. Значение накопления металлов в клетке. Актуальные проблемы гигиены и токсикологии. М.: Медицина, 1980.
4. Nakamura Y., Hasegawa Y., Tonogai, Kanamoto M., Tsuboi N., Murakami K. et al. Studies on the biological effects of rare earth elements: I. Method for analysis of dysprosium, europium, ytterbium and yttrium from the biological materials. *Eisei Kagaku*. 1991; 37: 28-38. <https://colab.ws/articles/10.1248%2Fjhs1956.37.28>.
5. Gwenzi W., Mangori L., Danha C., Chaukura N., Dunjana N., Sanganyado E. 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>.
6. Cendon D., Rowling B., Hughes C., Payne T.E., Hankin S.I., Harrison J.J., et al. Rare earth elements and yttrium as tracers of waste/rock-groundwater interactions. *Science of The Total Environment*. 2022; 830: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154706>.

7. Pereira W.V.D.S., Ramos S.J., Melo L.C.A., Dias Y.N., Martins G.C., Ferreira L.C.G. et al. Human and Environmental Exposure to Rare Earth Elements in Gold Mining Areas in the Northeastern Amazon. *Chemosphere*. 2023; 340: 139824. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139824>.
8. 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; 39(3): 132-146. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10308>.
9. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 6: Редкие f-элементы. М.: Экология, 1997.
10. 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>.
11. Паничев А.М., Барановская Н.В., Вах Е.А. Новые данные по химическому составу вод Джумалинского геотермального источника, Горный Алтай, Россия. Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2022; 4: 137-143. https://doi.org/10.52245/26867109_2022_4_137.
12. Спасский С.С. Токсичность окиси иттрия. *Гигиена труда и профессиональных заболеваний*. 1978; 7: 55-56.
13. Жалсараева Д.М., Ким Н.Ю., Жалсараев М.Д. Патоморфоз печени при действии иттрия сульфата. *Медицина в Кузбассе*. 2005; 4: 52-54.
14. Páramo M., Santamaría E., Idoate M.A., Rodríguez-Fraile M., Benito A., Collantes M., et al. A new animal model of atrophy-hypertrophy complex and liver damage following Yttrium-90 lobar selective internal radiation therapy in rabbits. *Scientific Reports*. 2022; 12: 1777. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05672-3>.
15. Han Y., Lee D.K., Kim S.H., Lee S., Jeon S., Cho W.S. High inflammogenic potential of rare earth oxide nanoparticles: The New Hazardous Entity. *Nanotoxicology*. 2018; 12: 712-728. <https://doi.org/10.1080/17435390.2018.1472311>.
16. Galusha A.L., Kruger P.C., Howard L.J., Parsons P.J. An assessment of exposure to rare earth elements among patients receiving long-term parenteral nutrition. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2018; 47:156-163. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.013>.
17. Liu Z., Ding Y., Xie S., Xiao H, Liu X, Fan X. Chronic exposure to yttrium induced cell apoptosis in the testis by mediating Ca2+/IP3R1/CaMKII signaling. *Frontiers in Public Health*. 2023; 30(11): 1104195. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1104195>.
18. 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 in Environmental Science*. 2022; 10: 948041. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948041>.
19. 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>.
20. Pagano G., Thomas P.J., Di Nunzio A., Trifuoggi M. Human exposures to rare earth elements: Present knowledge and research prospects. *Environmental Research*. 2019; 171: 493-500. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.004>.

21. Zhuang M., Wang L., Wu G., Wang K., Jiang X., Liu T., et al. Health risk assessment of rare earth elements in cereals from mining area in Shandong. China. *Scientific Reports*. 2017; 7: 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10256-7>.
22. Zhuang M., Zhao J., Li S., Liu D., Wang K., Xiao P., et al. Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in vegetables from mining area in Shandong, China. *Chemosphere*. 2017; 168: 578-582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.023>.
23. Yang L., Wang X., Nie H., Shao L., Wang G., Liu Y. Residual levels of rare earth elements in freshwater and marine fish and their health risk assessment from Shandong, China. *Marine Pollution Bulletin*. 2016; 107(1): 393-397. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.034>.
24. Wang W., Yang Y., Wang D., Huang L. Toxic Effects of Rare Earth Elements on Human Health: A Review. *Toxics*. 2024; 12(5): 317. <https://doi.org/10.3390/toxics12050317>.
25. Yin X., Martineau C., Demers I., Basiliko N. The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada. *Environmental Reviews*. 2021; 29(3): 354-377. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0115>.

References:

1. Balaram V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. *Geoscience Frontiers*. 2019;10 (4):1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.
2. Rim K., Koo K., Park J. Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: A literature review. *Safety and Health Work*. 2013; 4: 12-26. <https://doi.org/10.5491/SHAW.2013.4.1.12>.
3. Levina E.N. Znachenie nakopleniya metallov v kletke. Aktual'nye problemy gigieny i toksikologii. M.: Medicina, 1980. (In Russ.).
4. Nakamura Y., Hasegawa Y., Tonogai, Kanamoto M., Tsuboi N., Murakami K. et al. Studies on the biological effects of rare earth elements: I. Method for analysis of dysprosium, europium, ytterbium and yttrium from the biological materials. *Eisei Kagaku*. 1991; 37: 28-38. <https://colab.ws/articles/10.1248%2Fjhs1956.37.28>.
5. Gwenzi W., Mangori L., Danha C., Chaukura N., Dunjana N., Sanganyado E. 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>.
6. Cendon D., Rowling B., Hughes C., Payne T.E., Hankin S.I., Harrison J.J., et al. Rare earth elements and yttrium as tracers of waste/rock-groundwater interactions. *Science of The Total Environment*. 2022; 830: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154706>.
7. Pereira W.V.D.S., Ramos S.J., Melo L.C.A., Dias Y.N., Martins G.C., Ferreira L.C.G. et al. Human and Environmental Exposure to Rare Earth Elements in Gold Mining Areas in the Northeastern Amazon. *Chemosphere*. 2023; 340: 139824. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139824>.
8. Shchuchinov L.V., Kats V.E., Roldugin V.V., Novikova I.I. Study of coseismic geothermal reactions of groundwaters in the town of Gorno-Altai during the aftershock period of the chuye earthquake (2004-2023). *Medicina truda i ekologiya cheloveka*. 2024; 3: 132-146. DOI: 10.24412/2411-3794-2024-10308 (In Russ.).

9. Ivanov VV. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov*. – Kn. 6: Redkie f-elementy. M.: Ekologiya, 1997. (In Russ).
10. Borodina E.V., Borodina U.O. Surface water chemistry in the Kucherla river basin, the Altai mountains. *Water Resources*. 2020; 4: 368-379. <http://dx.doi.org/10.31857/S0321059620040045> (In Russ.).
11. Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Vakh E.A. New data on the chemical composition of the waters of the Dzhumalinsky geothermal spring, Gorny Altai, Russia. *Polevye issledovaniya v Altaiskom biosfernom zapovednike*. 2022; 4: 137-143. https://doi.org/10.52245/26867109_2022_4_137 (in Russ.).
12. Spasskij S.S. Toksichnost' okisi ittriya. *Gigiena truda i professional'nyh zabolevanij*. 1978; 7: 55-56. (In Russ.).
13. ZHalsaraeva D.M., Kim N.YU., ZHalsaraev M.D. Patomorfoz pecheni pri dejstvii ittriya sul'fata. *Medicina v Kuzbasse*. 2005; 4: 52-54. (In Russ.).
14. Páramo M., Santamaría E., Idoate M.A., Rodríguez-Fraile M., Benito A., Collantes M., et al. A new animal model of atrophy-hypertrophy complex and liver damage following Yttrium-90 lobar selective internal radiation therapy in rabbits. *Scientific Reports*. 2022; 12: 1777. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05672-3>.
15. Han Y., Lee D.K., Kim S.H., Lee S., Jeon S., Cho W.S. High inflammogenic potential of rare earth oxide nanoparticles: The New Hazardous Entity. *Nanotoxicology*. 2018; 12: 712-728. <https://doi.org/10.1080/17435390.2018.1472311>.
16. Galusha A.L., Kruger P.C., Howard L.J., Parsons P.J. An assessment of exposure to rare earth elements among patients receiving long-term parenteral nutrition. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2018; 47: 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.013>.
17. Liu Z., Ding Y., Xie S., Xiao H., Liu X., Fan X. Chronic exposure to yttrium induced cell apoptosis in the testis by mediating Ca²⁺/IP3R1/CaMKII signaling. *Frontiers in Public Health*. 2023; 30(11): 1104195. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1104195>.
18. 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 in Environmental Science*. 2022; 10: 948041. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948041>.
19. 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>.
20. Pagano G., Thomas P.J., Di Nunzio A., Trifuoggi M. Human exposures to rare earth elements: Present knowledge and research prospects. *Environmental Research*. 2019; 171: 493-500. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.004>.
21. Zhuang M., Wang L., Wu G., Wang K., Jiang X., Liu T., et al. Health risk assessment of rare earth elements in cereals from mining area in Shandong, China. *Scientific Reports*. 2017; 7: 1-6. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10256-7>.
22. Zhuang M., Zhao J., Li S., Liu D., Wang K., Xiao P., et al. Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in vegetables from mining area in Shandong, China. *Chemosphere*. 2017; 168: 578-582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.023>.
23. Yang L., Wang X., Nie H., Shao L., Wang G., Liu Y. Residual levels of rare earth elements in freshwater and marine fish and their health risk assessment from Shandong, China. *Marine Pollution Bulletin*. 2016; 107(1): 393-397. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.034>.

24. Wang W., Yang Y., Wang D., Huang L. Toxic Effects of Rare Earth Elements on Human Health: A Review. *Toxics*. 2024; 12(5): 317. <https://doi.org/10.3390/toxics12050317>.
25. Yin X., Martineau C., Demers I., Basiliko N. The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada. *Environmental Reviews*. 2021; 29(3): 354-377. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0115>.

Поступила/Received: 23.04.2025

Принята в печать/Accepted: 25.05.2025