

Лицевский урановорудный район Кольского региона – экологический аспект изучения

Каулина Т. В.¹, Ильченко В. Л.¹, Даувальтер В. А.², Слукровский З. И.², Афанасьева Е. Н.³

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, t.kaulina@ksc.ru, v.ilchenko@geoksc.apatity.ru

² Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты, v.dauvalter@ksc.ru

³ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, elena_afanasieva@vsegei.ru

Аннотация. Лицевский урановорудный район, расположенный на северо-западе Кольского региона, отличается повышенным радиоактивным фоном (7–15 мкР/час) от окружающих территорий с фоном 1–5 мкР/час и общим низким содержанием урана в породах – менее 1.5 ppm. Содержание урана увеличивается до 3–5 ppm в разломных зонах и гранитоидах Лицево-Арагубского комплекса, к которым приурочены наиболее крупные рудопрооявления урана Лицевского района, где содержание урана повышается до 100–500 ppm. При многоэтапности урановой минерализации от 2.6 до 0.4 млрд лет, последняя характеризуется образованием водосодержащих минералов шестивалентного урана, которые могут представлять основной источник урана при выветривании. Донные отложения озер Рыбачий-1 и Портлубол, расположенных в пределах Лицевского урановорудного района содержат в повышенных количествах уран, молибден и РЗЭ, что согласуется с содержанием этих элементов во вмещающих породах. Осаждение урана в озерах, вероятно, препятствует его попаданию в воду рек северо-запада Мурманской области. Данные по здоровью населения в ЗАТО городе Заозёрске (ближайшем к Лицевскому урановорудному району населенном пункте) показали, что у населения не обнаружено болезней, характерных при накоплении урана в организме.

Ключевые слова: урановые рудопрооявления, донные отложения, загрязнение воды, урановые минералы.

Litsa uranium ore area of the Kola region – environmental aspect

Kaulina T. V.¹, Il'chenko V. L.¹, Dauvalter V. A.², Slukovskii Z. I.², Afanasieva E. N.³

¹ Geological Institute of KSC RAS, Apatity, t.kaulina@ksc.ru

² Institute of North Industrial Ecology Problems Kola SC RAS, Apatity, v.dauvalter@ksc.ru

³ All-Russian Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky (VSEGEI), St. Petersburg, elena_afanasieva@vsegei.ru

Abstract. The Litsa uranium ore area, located in the north-west of the Kola region, is distinguished by an increased radioactive background (7–15 μ R/h) from the surrounding areas with a background of 1–5 μ R/h and an overall low uranium content in rocks – < 1.5 ppm. The uranium content increases up to 3–5 ppm in fault zones and granitoids of the Litsa-Araguba complex, which are hosts to the largest uranium ore occurrences in the Litsa area where the uranium content increases up to 100–500 ppm. Within multi-stage uranium mineralization from 2.6 to 0.4 Ga, the latter is characterized by the formation of hydrous minerals of hexavalent uranium, which may represent the main source of uranium during weathering. Bottom sediments of the lakes Rybachy-1 and Portlubil, located within the Litsa area, contain increased amounts of uranium, molybdenum and rare earth elements, which is consistent with the content of these elements in the host rocks. The deposition of uranium in lakes probably prevents it from entering the waters of rivers in the north-west Murmansk region. Data on the health of the population in the closed city of Zaozersk (the nearest settlement to the Litsa uranium ore area) showed that the population did not have diseases characteristic of the accumulation of uranium in the body.

Keywords: uranium ore occurrences, bottom sediments, water pollution, uranium minerals.

Введение

Лицевский урановорудный район, выделенный А. В. Савицким (Савицкий и др., 1995) в пределах Печенга-Лицевской металлогенической области и содержащий около 40 урановых рудопрооявлений, расположен на северо-западе Кольского региона между Печенгской структурой и комплексом Лицево-Арагубских гранитоидов (рис. 1). Лицевский рудный район в течение долгих лет

изучался сотрудниками ГРП «Невскгеология» и ВСЕГЕИ (Савицкий и др., 1995; Афанасьева и др., 2009, 2015, Serov, 2011 и ссылки там), а также сотрудниками ГИ КНЦ РАН (Каулина и др., 2021). Основное внимание уделялось геологическому и геохимическому строению района для оценки потенциальных запасов урана. И только в последние годы урановые аномалии Лицевского района стали рассматриваться с экологической точки зрения (Слуковский и др., 2020).

Уран считается металлом слабого биологического поглощения (Перельман, 1972) и не участвует в питании растений, хотя и присутствует в них в небольших количествах. Выход урановородных тел на поверхность не приводит к угнетению находящейся поблизости флоры и фауны, иначе это можно было бы использовать как поисковый признак. Тем не менее, продолжительное существование в приповерхностных условиях урановых рудопроявлений, которые, по сути, являются природными аналогами могильников урана и дочерних элементов, делает их изучение важным как с природоохранной точки зрения, так и с точки зрения безопасного захоронения радиоактивных отходов (Богуславский, 2024).

В отличие от других радиоактивных элементов, уран имеет высокую миграционную способность в присутствии кислорода. В окислительных условиях уран существует в форме комплексного катиона уранила – UO_2^{2+} , чьи соединения имеют более высокую растворимость, чем соединения четырехвалентных U и Th (Наумов, 1978). Загрязнение природных вод ураном в районах урановых месторождений и рудопроявлений происходит в результате взаимодействия воды с горными породами, что может иметь серьезные последствия для здоровья населения (Nolan, Weber, 2015; Sainietal., 2016; Costaetal., 2017; Slukovskii, 2023). Наиболее показательными в этом случае являются донные отложения (ДО) водоемов и водотоков, в том числе озер. Донные отложения отражают химический состав горных пород и почв водосборной площади, а также наследуют состав вмещающих пород по редким и рассеянным элементам (Страховенко, 2011; Даувальтер, 2012).

Данные по Республике Карелия показали, что содержание урана в современных отложениях озер варьирует от 0.1 до 42.3 ppm (среднее 0.91 ppm) (Slukovskii, 2023). Повышенное содержание урана в озерных отложениях наблюдается на участках, связанных с месторождениями или рудопроявлениями урана. Наибольший уровень накопления урана обнаружен в донных отложениях озер, которые находятся под влиянием Северо-Онежского рудно-геохимического района, где широко распространены рудопроявления, содержащие U, Fe, Mo и Cu.

Отмечены также случаи прямого загрязнения питьевой воды в районах урановых рудопроявлений. В Северной Португалии было обнаружено повышенное содержание урана в питьевой воде (Costaetal., 2017). Максимальное содержание урана составляло 3483 мкг/л при среднем значении в 129 мкг/л. В районе развиты урановые руды, локализованные в доордовикских метаосадках и связанные с метаморфическим ореолом герцинских гранитов. Уран находится во вторичных минералах, таких как салеит и аутунит, а также в аморфных оксидах и гидроокислах железа. Авторы делают вывод, что загрязнение воды связано с взаимодействием воды с урановыми рудами и с наличием разломов, что в комплексе создает условия для выноса урана из пород и минералов и колебаний качества подземных вод (Costaetal., 2017).

В США два основным водоносных горизонта «Высоких равнин» и «Центральной долины» показали высокий уровень загрязнения природным ураном (до 5400 мкг/л) на площади 22375 км² (Nolan, Weber, 2015). Содержание урана более чем в 10 раз превышает максимально возможный уровень загрязнения в 30 мкг/л для питьевой воды, согласно нормам Агентства по охране окружающей среды США. В этих регионах, богатых органическим углеродом, образуются вторичные урановые аномалии в результате выветривания исходных магматических пород. Большая часть урана находится в минералах нерастворимого U^{4+} (уранинит и др.) в почвах и осадочных отложениях, которые связаны с вулканитами, черными сланцами или гранитами. Высокое содержание нитратов в грунтовых водах приводит к изменению растворимости U за счет окислительного воздействия на минералы четырехвалентного урана; уран откладывается во вторичных, более растворимых минералах шестивалентного урана, что вызывает загрязнение грунтовых вод (Nolan, Weber, 2015).

В настоящей статье представлены обобщенные результаты комплексного изучения рудопроявлений Лицевского района. Приведено содержание урана и тория во вмещающих породах, изучены U-Th-содержащие минералы, рассмотрены предпосылки выщелачивания урана из пород и его накопления в воде и донных отложениях озер, а также оценено влияние Лицевского ураново-рудного района на экологию СЗ части Кольского региона.

Геология и геохимия района

В региональном плане Лицевский рудный район расположен в области сопряжения Кольского и Мурманского блоков. Большинство урановых рудопроявлений Лицевского района расположено в пределах Кольского блока, сложенного неоднократно метаморфизованными гнейсами и сланцами кольской серии архея (рис. 1).

Район имеет мозаично-блоковое строение и находится на пересечении тектонических и разломных зон субмеридианного и субширотного простирания, с которыми связана урановая минера-

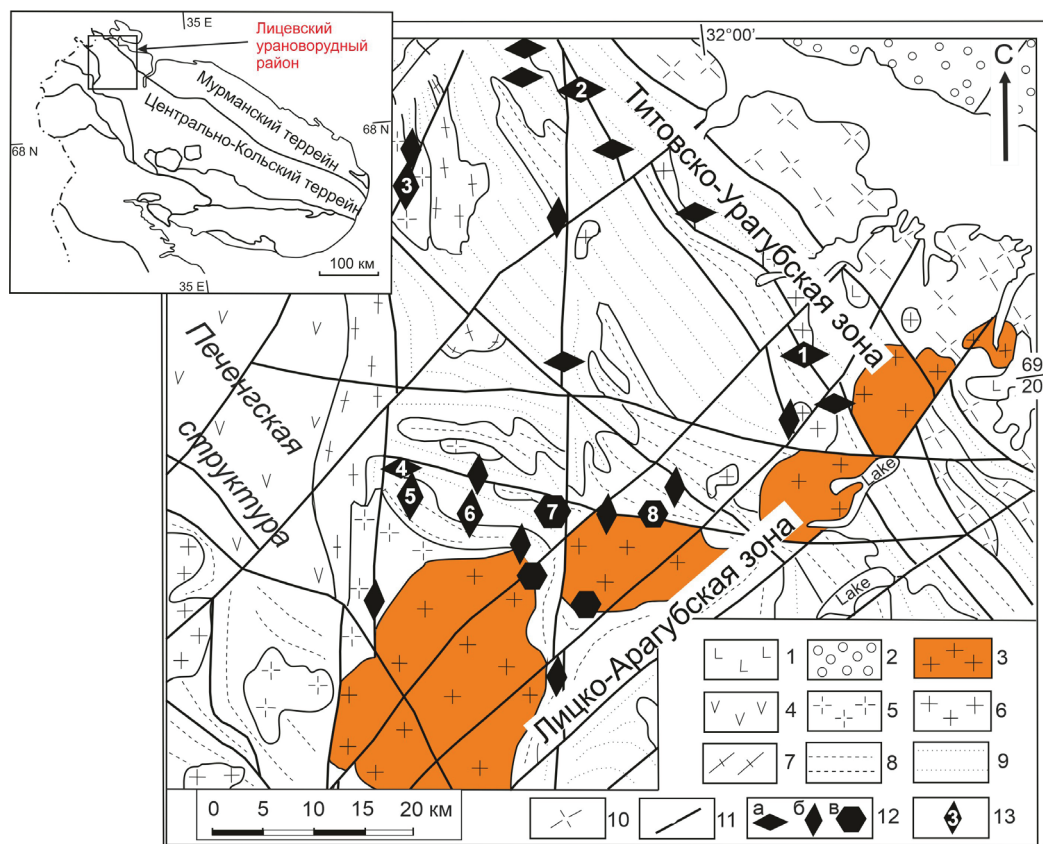


Рис. 1. Схема Лицевского урановорудного района (Савицкий и др., 1995).

1–2 – верхний протерозой (рифей): 1 – габбро-долериты Мурманского комплекса, 2 – осадки кильдинской серии; 3–5 – нижний протерозой: 3 – гранитоиды Лицо-Арагубского комплекса, 4 – породы печенгской серии, 5 – граниты каскельяврского комплекса; 6–9 – верхний архей: 6 – граниты вороньинского комплекса, 7 – диориты-плагиограниты пороярвинского комплекса, 8–9 – гнейсы кольской серии: 8 – Amf-Bt, 9 – глиноземистые и Grt-Bt; 10 – нижний архей: тоналиты и плагиограниты, 11 – разломы, 12 – типы уранового оруденения, 13 – крупные рудопроявления.

Типы уранового оруденения: а – REE-Th-U в пегматоидных гранитах, б – U в хлорит-альбитовых метасоматитах, в – U в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах.

Крупные урановые рудопроявления: 1 – Скальное, 2 – Дикое, 3 – Полярное, 4 – Кошкаявр, 5 – Намвара, 6 – Чептъявр, 7 – Лицевское, 8 – Береговое.

Fig. 1. Scheme of the Litsa uranium ore area (Savitsky et al., 1995).

Types of uranium mineralization: a – REE-Th-U in pegmatoid granites, b – U in chlorite-albite metasomatites, c – U in albite-hydromica-chlorite metasomatites.

Large uranium ore occurrences: 1 – Skal'noe, 2 – Dikoe, 3 – Polyarnoe, 4 – Koshkajavr, 5 – Namvara, 6 – Cheptjavr, 7 – Litsevscoe, 8 – Beregovoe.

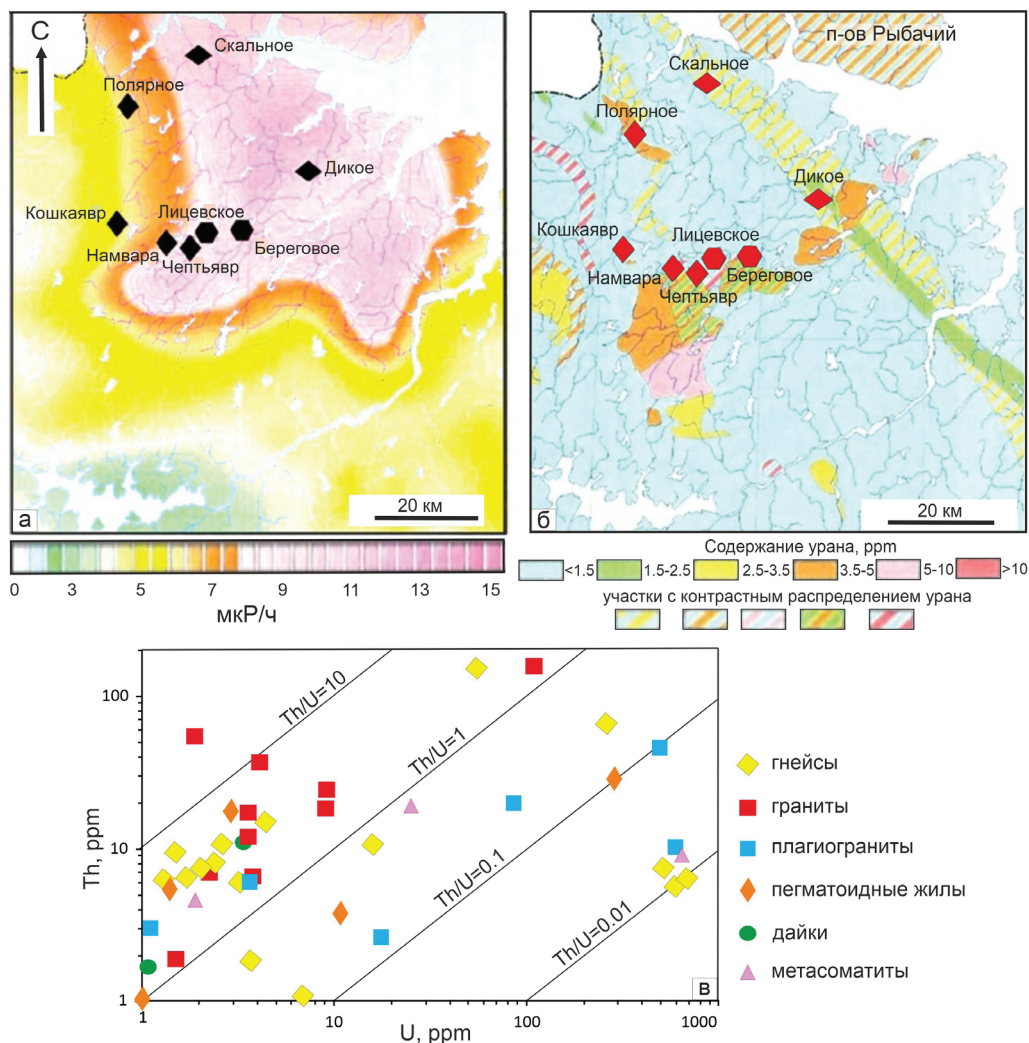


Рис. 2. Радиоактивность пород (а) и содержание урана (б) в пределах СЗ Кольского региона, включая Лицевский урановорудный район (Serov, 2011). Значками показаны крупные урановые рудопроявления. Содержание урана и тория в породах рудопроявлений Дикое, Береговое и Лицевское (данные из Каулина и др., 2021) – (в).
Fig. 2. Radioactivity of rocks (a) and uranium content (b) within the NW Kola region including the Litsaur uranium ore area (Serov, 2011). The symbols indicate large uranium ore occurrences. The content of uranium and thorium in rocks of the Dikoe, Beregovoe and Litsevscoe ore occurrences (data from Kaulina et al., 2021) – (c).

лизация (рис. 1) (Савицкий и др., 1995). Выявлено 4 типа урановой и комплексной минерализации, образованной в интервале от позднего архея до палеозоя: 1) 2.6–2.3 млрд лет – REE-Th-U минерализация в пегматоидных гранитах и кварц-полевошпатовых метасоматитах; 2) 2.2–2.1 млрд лет – U минерализация в хлорит-альбитовых метасоматитах и альбититах; 3) 1.85–1.75 млрд лет – Th-U минерализация в кварц-альбит-микроклиновых метасоматитах; 4) 400–300 млн лет – U минерализация в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах (Савицкий и др., 1995; Каулина и др., 2021).

В результате работ ГРП «Невскеология» и ВСЕГЕИ (Савицкий и др., 1995; Афанасьева и др., 2009, 2015, Serov, 2011 и ссылки там) на северо-западе Кольского региона проводилось крупномасштабное геологическое картирование и измерение гамма-активности (рис. 2а). В целом преобладает низкий уровень радиоактивности, который еще больше понижается над заболоченными участками. В пределах Лицевского района фоновая радиоактивность повышается до 15–20 мкР/час (рис. 2а). Содержание урана по северо-западу региона находится в пределах 1–1.5 ppm. Повышенные содержания урана отмечаются в гранитоидах лицо-арагубского комплекса, в некоторых участках Печенгской структуры и в Титовско-Урагубской зоне (рис. 2б).

На участках урановых рудопроявлений Лицевского района содержания урана и тория в архейских гнейсах и плагิโอгранитах, не содержащих рудоносные тела, также невысокое – 1–5 ppm, выше содержание урана в гранитах – до 8 ppm, тория обычно больше, чем урана – до 10–70 ppm (рис. 2 в). Содержание урана существенно повышается (до 500 ppm, тория – до 150 ppm) на участках урановых аномалий, причем не только в рудоносных породах, но и во вмещающих гнейсах и гранитоидах, что связано с гидротермальной природой и «пропиткой» всех пород рудопроявлений ураноносными флюидами (Каулина и др., 2021).

Отношение Th-U в породах варьирует от 0.01 до 15 (рис. 2 в). Установлено, что для каждой провинции характерны постоянные величины Th-U отношения. Для магматических пород обычны значения от 2 до 7, существенные отклонения от этих величин в большинстве случаев обусловлены вторичными процессами метасоматоза и гидротермальных изменений (Щербина и др., 2013).

Урановые и ториевые минералы

Изучение урановых и ториевых фаз в породах рудопроявлений Дикое, Береговое и Лицевское показало изменение состава минерализации во времени (Каулина и др., 2021; Ильченко и др., 2022, 2023). Наиболее ранней является REE-Th минерализация рудопроявления Дикого возраста 2.6 млрд лет, развитая в пегматоидных жилах. Минерализация представлена монацитом-(Ce), вместе с которым образуется циркон и апатит. Там же, 2.3 млрд лет спустя, формируется U минерализация, представленная уранинитом (рис. 3 а).

Далее 1.87–1.85 млрд лет назад развивается Th-U минерализация на рудопроявлениях Береговое и Лицевское с образованием ториевых и урановых минералов: монацита-(Ce), циркона, торита (ThSiO_4), браннерита (UTi_2O_6) и коффинита (USiO_4) (рис. 3 б, в, г).

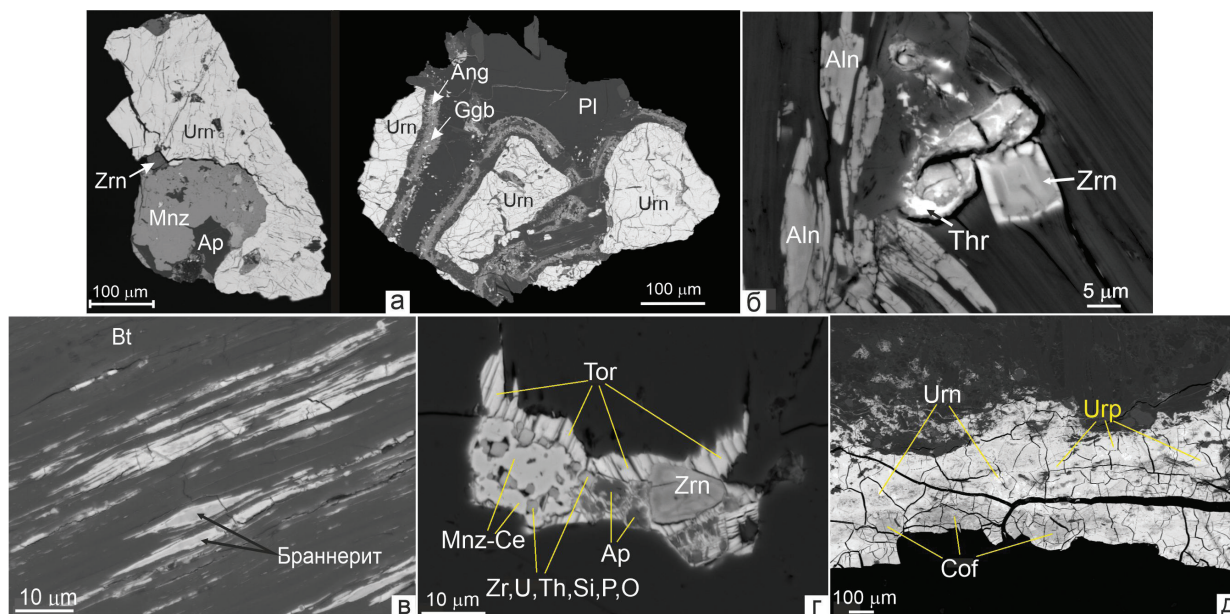


Рис. 3. Сrostки уранинита (Urn) с монацитом (Mnz), апатитом (Ap) и цирконом (Zrn), развитие каймгальгенбергита (Ggb) и англезита (Ang) в пегматоидных гранитах рудопроявления Дикого (а). Алланит (Aln), циркон, торит (Thr) и браннерит в биотите из гранитогнейса рудопроявления Берегового (б, в). Кайма торбернита (Tor) на сrostках монацита, апатита и циркона (г) и кайма уранинита, уранофана и коффинита (д) в микроклин-плагиоклазовой жиле рудопроявления Лицевского. Фото в обратно-рассеянных электронах. Аббревиатуры минералов по (Warr, 2021).

Fig. 3. Intergrowths of uraninite (Urn), monazite (Mnz), apatite (Ap) and zircon (Zrn), and rims of galgenbergite (Ggb) and anglesite (Ang) in pegmatoid granites of the Dikoe ore occurrence (a). Allanite (Aln), zircon, thorite (Thr) and brannerite in biotite grains from granite gneiss from the Beregovoe ore occurrence (b, c). A torbernite rim (Tor) on monazite, apatite and zircon intergrowths (d) and a rim of uraninite, uranophane and coffinite (e) in a microcline-plagioclase vein from the Litsevscoe ore occurrence. BSE. Mineral abbreviation safter (Warr, 2021).

Заключительная палеозойская урановая минерализация развивалась 300–400 млн лет назад. В рудопроявлениях Лицевское и Береговое она проявлена и представлена уранинитом (UO_2), торбернитом (медноурановая слюдка – $\text{Cu}[\text{UO}_2]_2[\text{PO}_4]_2 \times 12\text{H}_2\text{O}$), уранофаном ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2[\text{SiO}_3\text{OH}]_2 \times 5\text{H}_2\text{O}$), аморфными оксидами урана, коффинитом-II, казолитом ($\text{Pb}(\text{UO}_2)\text{SiO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$) (рис. 3 д).

Палеозойская урановая минерализация представлена, в основном, водосодержащими минералами шестивалентного урана, такими как уранофан, казолит и торбернит. Они более растворимы, чем монацит, циркон и уранинит предыдущих этапов минерализации. Отсюда следует, что именно палеозойская урановая минерализация может представлять собой источник урана при его выщелачивании в гипергенных условиях. Активная водная миграция урана в сочетании с переменной валентностью создают предпосылки для формирования гипергенных геохимических аномалий (Богуславский, 2024).

Загрязнение озер в пределах Лицевскогорурановорудного района

Известно, что водоемы служат коллекторами химических элементов и отражают все виды загрязнений. Донные отложения накапливают сведения о потоках элементов в биосфере в историческом срезе (Даувальтер, 2012 и ссылки там). В большинстве водных систем концентрации элементов в верхних слоях донных отложений намного выше, чем концентрации элементов, растворенных в водной толще.

Изучение малых озер северной части Мурманской области было проведено сотрудниками Института проблем промышленной экологии севера (ИППЭС РАН). Были изучены озера – Рыбачий-1, Северное и Портлубол (рис. 4).

Содержание U в современных осадках озера Рыбачий-1 варьирует от 32 до 207 ppm, а в осадках озера Северного – от 77 до 204 ppm, что в 100 раз превышает кларк урана для земной коры (Даувальтер и др., 2018; Слуковский и др., 2020; Озера города..., 2023). В колонках ДО обоих озер отмечено увеличение концентраций урана от верхних к более глубоким слоям. Такая закономерность связана с преобладанием природных геолого-геохимических факторов в формировании химического состава современных почв или донных отложений. Поскольку ДО озер Рыбачий-1, Северного

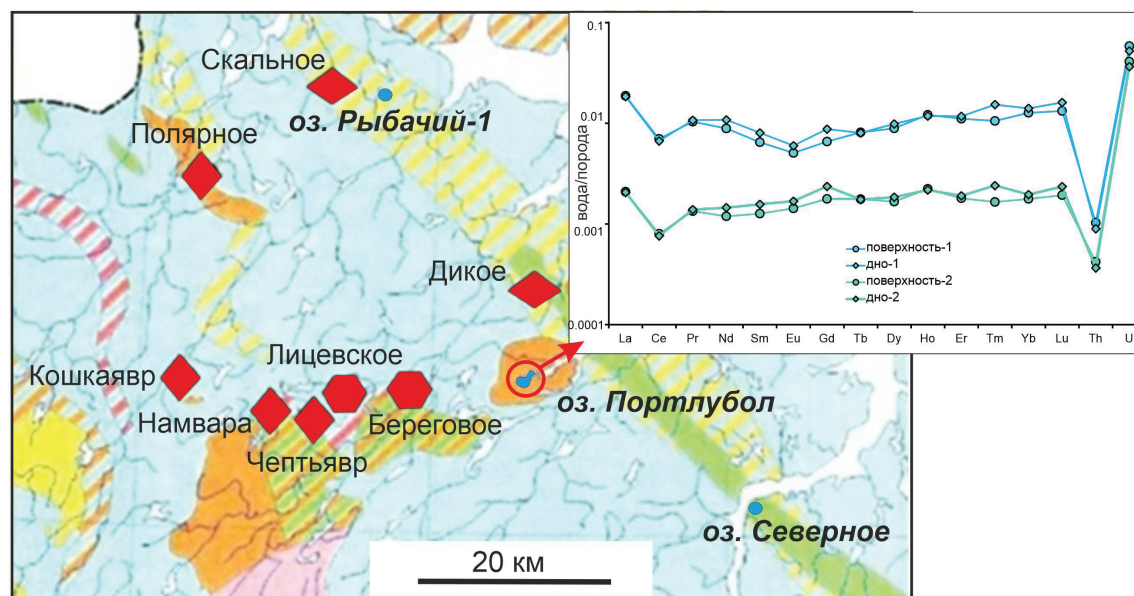


Рис. 4. Расположение изученных озер в пределах Лицевскогорурановорудного района (оз. Рыбачий-1, оз. Северное и оз. Портлубол). Значки для озер Рыбачий-1 и Северное – внесмасштаба. На врезке – распределение РЗЭ, U, Th в воде озера Портлубол, нормированные на содержание элементов во вмещающем гранодиорите и граните.

Fig. 4. Location of the studied lakes within the Litsa uranium ore area (Lake Rybachy-1, Lake Severnoye and Lake Portlubole). Symbols for lakes Rybachy-1 and Severnoye are not to scale. The inset shows the pattern of REE, U, and Th in water of the Portlubole Lake, normalized to the content of elements in the host granodiorite and granite.

и озер Карелии представляют собой образования одного типа озерного седиментогенеза (сапропели), то можно говорить об уникальных урановых геохимических аномалиях на севере Мурманской области (Слуковский и др., 2020). Установлена тесная корреляция урана в донных отложениях с молибденом и редкоземельными элементами, которые обычно сопутствуют урану в материнских породах. Показано, что значительную роль в аккумуляции этого металла в озерных осадках играет органическое вещество (Слуковский и др., 2020).

Данные для озера Портлубол (рис. 4) показали, что донные отложения содержат в повышенных количествах уран (30–49 ppm), торий (14–22 ppm) и редкоземельные элементы ($\Sigma\text{REE} = 750\text{--}970$ ppm). Полученные результаты согласуются с расположением этого озера в пределах гранитоидного Няльярвского массива комплекса лицко-арагубских гранитоидов, породы которых существенно обогащены перечисленными элементами.

В воде озера Портлубол содержания урана и тория (поверхность – дно) также существенно повышены: $\text{U} = 211\text{--}189$ мкг/л, $\text{Th} = 18\text{--}15$ мкг/л. Распределение содержания REE, U и Th в воде, нормированное на содержание этих элементов в гранодиорите и граните вмещающего массива, показывает, что распределение REE в воде в целом аналогично распределению REE в породе (рис. 4, врезка). Отрицательные аномалии Ce и Th в воде согласуются с тем, что четырехвалентные Ce^{4+} и Th^{4+} содержатся, в основном, в акцессорных минералах, которые более устойчивы к выветриванию, чем породообразующие. Повышенное содержание урана по сравнению с торием полностью согласуется с различным поведением этих элементов в гипергенных процессах в связи с повышенной растворимостью и мобильностью урана.

По данным А. Богуславского (2024) концентрации урана в литохимических аномалиях донных отложений на один–два порядка ниже концентрации урана в исходных рудах. Это происходит вследствие разубоживания выносимых рудных частиц при перемешивании их с отложениями вмещающих пород, содержащими существенно более низкие концентрации. Концентрации урана в воде могут на один–два порядка превышать фон, однако уже на расстоянии первых километров это превышение сходит на нет, либо превышает фоновые значения не более чем в 3–4 раза.

Возможные последствия для здоровья населения СЗ Мурманской области

Уран может попасть в организм человека либо с водой и пищей, либо воздушно-капельным путем при вдыхании загрязненных ураном аэрозолей или частиц пыли. Основными местами отложения урана в организме являются почки и кости, соответственно и основные проблемы со здоровьем вследствие чрезмерного поступления урана в организм, в основном, с питьевой водой, связаны с болезнями почек (Vicente-Vicente, 2010) и поражением костей (Kurtio et al., 2004). Растворимость соединений урана, пути воздействия на организм и время контакта являются основными факторами, от которых зависит степень вреда, нанесенного человеческому организму (Saini et al., 2016).

Как уже упоминалось, содержание урана в воде свыше 30 мкг/л оказывает вредное воздействие на организм человека (Nolan et al., 2015). Донные отложения водоемов являются хранилищем многих тяжелых металлов и должны быть тщательно исследованы при оценке качества воды водоемов, которые предполагается использовать (Дауэльтер, 2012 и ссылки там).

Лицевский урановорудный район достаточно безлюдный: здесь нет постоянного населения, которое подвергалось бы опасности из-за употребления загрязненной ураном воды. Наиболее протяженные реки, текущие через Лицевский район, это Печенга, Титовка и Западная Лица, последняя протекает прямо через одно из наиболее крупных урановых рудопроявлений – Береговое (рис. 5). Эти реки, теоретически, могут достаточно далеко переносить уран, но данные А. Е. Богуславского (2024) показывают, что через первые километры от рудопроявления загрязнение ураном в воде ручьев и рек существенно уменьшается и не превышает фоновых значений благодаря разбавлению загрязненной воды чистой водой. С другой стороны, при очень большом количестве озер в Мурманской области и высоком содержании урана в донных отложениях озер (Слуковский и др., 2020), скорее всего, весь вынесенный при гипергенном выветривании уран оседает в озерах (служящих отстойниками) на геохимических барьерах, таких как органическое вещество и гидроокис-

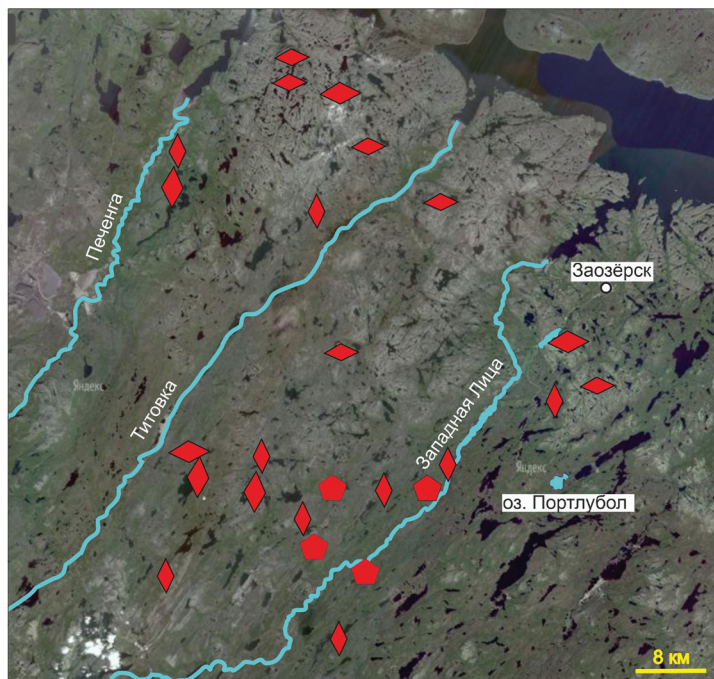


Рис. 5. Реки и озера Лицевского урановорудного района с нанесенными урановыми рудопроявлениями (карта Яндекс, вид со спутника).

Fig. 5. Rivers and lakes of the Litsa uranium ore area with uranium ore occurrences (Yandex map, satellite image).

лы железа. Известно (Титаева, 2002), что геохимическое поведение урана в гипергенных условиях в значительной мере определяется окислительно-восстановительными реакциями, где ведущую роль играют органическое вещество и железо. По результатам наблюдения на руднике «LosRatones» на юго-западе Испании установлено, что в условиях взаимодействия воды с урановыми минералами, низкая концентрация урана в подземных водах обусловлена с осаждением урана с гидроксидами железа. Гидроокислы железа поглощают почти весь уран, растворенный в шахтных водах, прежде чем они выходят на поверхность (Gomez et al., 2006).

Единственный населенный пункт, наиболее близкий к Лицевскому району, а именно к рудопроявлению Дикому – это ЗАТО г. Заозёрска (рис. 5). Данные по здоровью населения в г. Заозёрске (Клюкина, 2018) показали, что у населения не обнаружено ни заболеваний почек, ни болезней костно-мышечной системы, характерных при накоплении урана в организме. Хотя в целом, в Печенгском районе отмечены гломерулярные болезни почек, что связывается автором с антропогенной деятельностью и работой комбината Печенганикель.

Заключение

Активная водная миграция урана в сочетании с переменной валентностью создают предпосылки для формирования гипергенных геохимических аномалий. При наличии природных урановых рудопроявлений, даже в отсутствии горнодобывающих предприятий, в грунтовых водах, поверхностных водах и донных отложениях озер могут отмечаться высокие содержания радиоизотопов за счет взаимодействия воды с горными породами. Химический состав озерных отложений отражает геохимические особенности горных пород, расположенных вблизи водного объекта.

Лицевский урановорудный район, расположенный на северо-западе Кольского региона и содержащий около 40 крупных и мелких рудопроявлений урана, отличается повышенным радиоактивным фоном (до 7–15 мкР/час) от окружающих территорий региона с фоном 1–5 мкР/час. Фоновое содержание урана в породах северо-запада Кольского региона составляет менее 1.5 ppm. Содержание урана увеличивается до 3–5 ppm в разломных зонах и гранитоидах лицко-арагубского комплекса, к которым приурочены наиболее крупные рудопроявления урана. На рудопроявлениях содержание урана в породах повышается до 100–500 ppm.

При многоэтапности урановой минерализации Лицевского района, развивавшейся от 2.6 до 0.4 млрд лет, только последняя характеризуется водосодержащими минералами шестивалентно-

го урана (уранофан, казолит, торбернит), которые, из-за своей повышенной растворимости, могут представлять собой источник урана при его выщелачивании в гипергенных условиях.

Донные отложения озер Рыбачий-1 и Портлубол, расположенных в пределах Лицевского урановорудного района содержат в повышенных количествах уран, молибден и РЗЭ, что согласуется с содержанием этих элементов во вмещающих породах. Осаждение урана в озерах, вероятно, препятствует его попаданию в воду рек северо-запада Мурманской области.

Данные по здоровью населения в ЗАТО г. Заозёрска (ближайшем к Лицевскому урановорудному району в населенном пункте) показали, что у населения не обнаружено болезней, характерных при накоплении урана в организме.

Таким образом, рудопроявления Лицевского урановорудного района не представляют экологической опасности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках тем НИР ФИЦ КНЦ РАН FMEZ-2024-0006 и FMEZ-2024-0014.

Литература

1. Афанасьева Е. Н., Миронов Ю. Б. Металлогения урана Балтийского щита // Разведка и охрана недр. 2015. № 10. С. 82–88.
2. Афанасьева Е. Н., Михайлов В. А., Былинская Л. В., Липнер А. А., Серов Л. В. Ураноносность Кольского полуострова // Информационный сб. «Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов». М. Изд-во: ВИМС. 2009. Вып. 153. С. 18–26.
3. Богуславский А. Е. Поведение урана и сопутствующих элементов в зоне воздействия хранилищ низкоактивных отходов предприятий ядерно-топливного цикла / дисс.... д.г.-м.н., 2024. 364 с.
4. Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск. Изд-во: МГТУ, 2012. 242 с.
5. Даувальтер В. А., Терентьев П. М., Денисов Д. Б., Удачин В. Н., Филиппова К. А., Борисов А. П. Реконструкция загрязнения территории полуострова Рыбачий Мурманской области тяжелыми металлами // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 441–444. <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.112>.
6. Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н., Каулина Т. В., Лялина Л. И., Ниткина Е. А., Мокрушина О. Д. Лицевское рудопроявление урана (Арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые результаты петрофизических и геохимических исследований // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 393–404. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.44>.
7. Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н., Каулина Т. В., Нерович Л. И., Савченко Е. Э., Кашук М. О. Рудопроявления урана Лицевское и Приозерное (Лицевский урановорудный район Кольского региона): петрофизические, геохимические и минералогические данные // Региональная геология и металлогения. 2023. № 96. С. 111–122. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2023_96_111-122.
8. Каулина Т. В., Афанасьева Е. Н., Ильченко В. А., Аведисян А. А., Нерович Л. И., Лялина Л. М., Ниткина Е. А., Мокрушина О. Д. Лицевский урановорудный район. М. Изд-во: ГЕОС, 2021. 136 с.
9. Клюкина Э. С. Экологические угрозы здоровью населения промышленных территорий Арктического региона // Труды КНЦ РАН. 2018. № 2(9). С. 91–103. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.2.91-103>.
10. Наумов Г. Б. Основы физико-химической модели уранового рудообразования. М. Изд-во: Атомиздат, 1978. 216 с.
11. Озера города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности : монография / З. И. Слуковский, Д. Б. Денисов, В. А. Даувальтер и др.; науч. ред. Т. И. Моисеенко. Апатиты. Изд-во: ФИЦ КНЦ РАН. 2023. 174 с.
12. Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М. изд-во: Недра, 1972. 357 с.
13. Савицкий А. В., Громов Ю. А., Мельников Е. В., Шариков П. И. Урановое оруденение Лицевского района на Кольском полуострове (Россия) // Геология рудных месторождений, 1995. № 5. С. 403–416.
14. Слуковский З. И., Гузева А. В., Даувальтер В. А., Удачин В. Н., Денисов Д. Б. Урановые аномалии в современных донных отложениях озер северной части Мурманской области, Арктика // Геохимия. 2020. Т. 65. № 12. С. 1231–1236.
15. Страховенко В. Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири / дис. ... д.г.-м.н., Новосибирск. Изд-во: Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН. 2011. 306 с.

16. Титаева Н. А. Геохимия изотопов радиоактивных элементов (U, Th, Ra) / дис. в форме научн. доклада д.г.-м.н. М. Изд-во: МГУ. 2002. 52 с.
17. Щербина В. В., Наумов Г. Б., Макаров Е. С., Герасимовский В. И., Ермолаев Н. П., Тарасов М. С., Тугаринов А. И., Барсуков Вик. Л., Соколова Н. Т., Коченов А. В., Германов А. И. Основные черты геохимии урана. Томск. Изд-во: Из-воSTT, 2013. 374 с.
18. Costa M. R., Pereira A. J. S. C., Neves L. J. P. F., Ferreira A. Potential human health impact of groundwater in non-exploited uranium ores: The case of Horta da Vilarica (NE Portugal) // *Journal of Geochemical Exploration*. 2017. V. 183. P. 191–196.
19. Gomez P., Garralón A., Buil B., Turrero Ma. J., Sanchez L., de la Cruz B. Modeling of geochemical processes related to uranium mobilization in the groundwater of a uranium mine // *The Science of the total environment*. 2006. V. 366. Iss. 1. P. 295–309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.06.024>.
20. Kurttio P., Komulainen H., Leino A., Salonen L., Auvinen A., Saha H. Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water // *Environ. Health Persp.* 2004. V. 113 (1). P. 68–72.
21. Nolan J., Weber K. A. Natural Uranium Contamination in Major U.S. Aquifers Linked to Nitrate // *Environmental Science and Technology Letters*. 2015. No 2. P. 215–220.
22. Saini K., Singh P., Singh Bajwa B. Comparative statistical analysis of carcinogenic and non-carcinogenic effects of uranium in groundwater samples from different regions of Punjab, India // *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. V. 118. P. 196–200.
23. Serov L. Métallogenèse de L'uranium dans la Région de Litsa (Péninsule de Kola, Russie) / Ph.D. Thesis, Nancy Université Henry Poincaré (en Géosciences), Nancy, France, 24. June, 2011.
24. Slukovskii Z. Uranium in Lake Sediments of Humid Zone: A Case Study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia) // *Water*. 2023. No 15. P. 1360.
25. Vicente-Vicente L., Quiros Y., Pérez-Barriocanal F., López-Novoa J. M., López-Hernández F. J., Morales, A. I. Nephrotoxicity of Uranium: Pathophysiological, Diagnostic and Therapeutic Perspectives. *Toxicol.Sci.* 2010. V. 118 (2). P. 324–347.
26. Warr L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85. P. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>.