

УДК 553.495(470.21)  
DOI: 10.52349/0869-7892\_2023\_96\_111-122

В. Л. Ильченко (ГИ КНЦ РАН), Е. Н. Афанасьева (Институт Карпинского),  
Т. В. Каулина, Л. И. Нерович, Е. Э. Савченко, М. О. Кашук (ГИ КНЦ РАН)

## РУДОПРОЯВЛЕНИЯ УРАНА ЛИЦЕВСКОЕ И ПРИОЗЕРНОЕ (ЛИЦЕВСКИЙ УРАНОВОРУДНЫЙ РАЙОН КОЛЬСКОГО РЕГИОНА): ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Проведены петрофизические, геохимические и минералогические исследования пород рудопроявлений урана Лицевское и Приозерное в Лицевском рудном районе Кольского региона. Результаты показали, что плотность и показатель упругой анизотропии пород отражают интенсивность проявления рудной минерализации. Отмечены высокая плотность (3,39 г/см<sup>3</sup>) при низких значениях показателя упругой анизотропии (2,3%) в образцах пород с урановой и сульфидной минерализацией. Электронная микроскопия урановых и ториевых фаз в породах Лицевского рудопроявления подтвердила два этапа формирования урановорудной минерализации, разделенных этапом образования сульфидов (пирит и халькопирит). Полученные данные могут быть использованы при оценке потенциальной рудоносности территорий с проявлением многостадийных гидротермально-метасоматических преобразований.

*Ключевые слова:* урановые рудопроявления, физические свойства пород, Лицевский район, геохимия урана и тория.

V. L. Ilchenko (GI KSC RAS), E. N. Afanasieva (Karpinsky Institute),  
T. V. Kaulina, L. I. Nerovich, E. E. Savchenko, M. O. Kashuk (GI KSC RAS)

## LITSEVSKY AND PRIOZERNY URANIUM ORE SITES (LITSEVSKY URANIUM ORE DISTRICT OF THE KOLA REGION): PETROPHYSICAL, GEOCHEMICAL, AND MINERALOGICAL DATA

Petrophysical, geochemical, and mineralogical studies of the rocks from the Litsevsky and Priozerny uranium ore sites in the Litsevsky ore district of the Kola region were carried out. The results showed that the density and elastic anisotropy of rocks reflect the intensity of mineralization. High density (3.39 g/cm<sup>3</sup>) with low values of elastic anisotropy (2.3%) were noted in rock samples with uranium and sulphide mineralization. Electron microscopy of uranium and thorium phases in the rocks of the Litsevsky ore sites confirmed two stages in the formation of uranium mineralization, separated by the stage of sulphides (pyrite and chalcopyrite) formation. The data obtained can be used in assessing the potential ore content of areas with the manifestation of multi-stage hydrothermal alterations.

*Keywords:* uranium ore shows, physical properties of rocks, Litsevsky district, geochemistry of uranium and thorium.

**Для цитирования:** Ильченко В. Л. Рудопроявления урана Лицевское и Приозерное (Лицевский урановорудный район Кольского региона): петрофизические, геохимические и минералогические данные / В. Л. Ильченко, Е. Н. Афанасьева, Т. В. Каулина, Л. И. Нерович, Е. Э. Савченко, М. О. Кашук // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 96. – С. 111–122. DOI: 10.52349/0869-7892\_2023\_96\_111-122

**Введение.** Месторождения редких и радиоактивных металлов заслуживают особого внимания, поскольку в них заинтересованы энергетические и высокотехнологичные производства, характеризующие высокоуровневые и наукоемкие отрасли народного хозяйства. В условиях современного снижения темпов поисков новых месторождений этих металлов (прежде всего урана) одной из актуальных задач является дополнительное изучение уже известных, но не разрабатываемых месторождений с целью оценки перспектив рудоносности различных территорий.

В этом отношении высоким урановым потенциалом обладает северо-западная часть Кольского региона, включающая Печенга-Лицевскую рудную субпровинцию, расположенную на пересечении ряда региональных тектонических зон разного направления [4; 5; 9; 10], что служит причиной для повышенной проницаемости земной коры с возможностью перемещения флюидных потоков из различных источников с образованием рудных систем разных уровней глубинности, возраста и продуктивности. В пределах изучаемой территории наблюдается наложение одних рудоносных

структур на другие, что является отражением ранне- и позднекарельских эпох протоактивизации в понимании В. И. Казанского (1988 г.).

Лицевский урановорудный район представляет собой фрагмент Печенгско-Лицевской субпровинции. Его металлогенический облик определяется большим количеством (около 40) урановорудных объектов в ранге крупных рудопроявлений (Лицевское, Береговое), проявлений (Ярв, Кошкаяр, Скальное, Дикое, Приозерное и др.), относимых к различным рудно-формационным типам (рис. 1). Изучением особенностей локализации уранового оруденения в пределах Лицевского рудного района долгие годы занимались специалисты ГП «Невскогеология» и Института Карпинского. Результаты этих работ обобщены в многочисленных отчетах и публикациях [1; 5; 9].

В региональном плане Лицевский урановорудный район расположен в области сопряжения Кольского и Мурманского блоков, разделенных Титовско-Урагубской зоной глубинных разломов, в экзоконтакте Лебяжинского массива гранитоидов. Структурный план района определяется пересечением разломных зон различных направлений, что нашло отражение в его сложном мозаично-блоковом строении (рис. 1). Все это определило высокий урановый потенциал Лицевского рудного района, прогнозные ресурсы урана которого по категории  $P_3$  составляют 102 000 тыс. т.

Формирование урановой минерализации Лицевского урановорудного района связано в основном с проявлением метасоматических процессов в разломных зонах сдвигового типа. Наиболее высокие концентрации урана выявлены в зонах

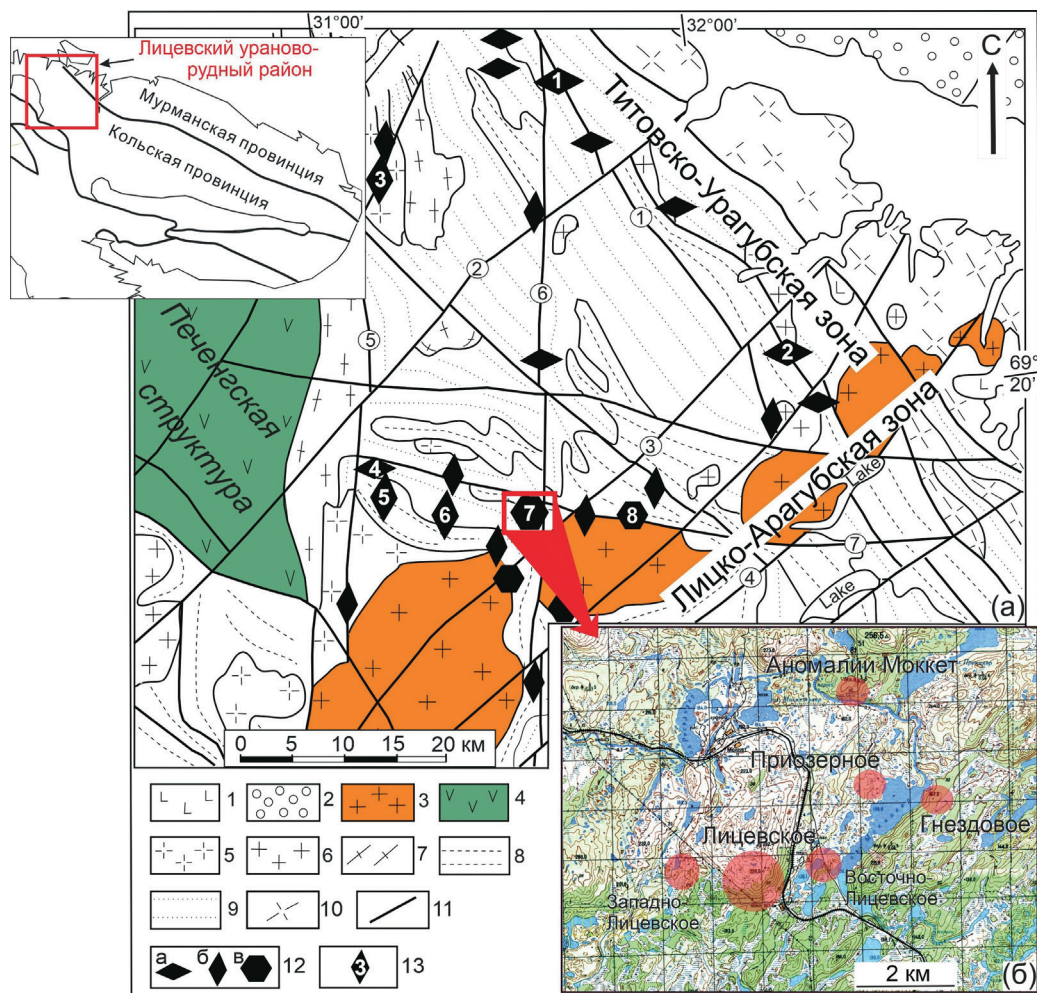


Рис. 1. Карта Лицевского урановорудного района по [9] с упрощениями (а); схема расположения Лицевского и Приозерного рудопроявлений (б)

1, 2 – верхний протерозой (рифей): 1 – габбродолериты и долериты Мурманского комплекса, 2 – песчаники, алевролиты, аргиллиты кильдинской серии; 3–5 – нижний протерозой: 3 – граниты-гранодиориты лицко-арагубского комплекса, 4 – вулканогенно-осадочные породы печенгской серии, 5 – граниты каскельярского комплекса; 6–9 – верхний архей: 6 – граниты вороньинского комплекса, 7 – диориты-плагииграниты пороярвинского комплекса, 8–9 – гнейсы кольской серии: 8 – амфибол-биотитовые, 9 – глиноземистые и гранат-биотитовые; 10 – нижний архей: тоналиты и плагииграниты; 11 – разломы (1 – Урагубский, 2 – Титовский, 3 – Лицевский, 4 – Арагубский, 5 – Нясюкско-Кучинтундровский, 6 – Урдозерский; 7 – Чептьярский); 12 – типы уранового оруденения (а – REE-Th в пегматоидных гранитах (2,5 млрд лет); б – U в кварц-плагииоклазовых и хлорит-альбитовых метасоматитах (2,3–2,2 млрд лет); в – U в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах (400–300 млн лет); 13 – крупные урановые рудопроявления и проявления (1 – Скальное, 2 – Дикое, 3 – Полярное, 4 – Кошкаяр, 5 – Намвара, 6 – Чептьяр, 7 – Лицевское, 8 – Береговое)

проявления многостадийных гидротермально-метасоматических преобразований, где высокотемпературные изменения сменяются низкотемпературными гидротермально-метасоматическими образованиями с развитием рудоносных жил. Самым крупным в пределах данного рудного района считается Лицевское рудопроявление, связанное с многоэтапной активизацией, что позволяет отнести это рудопроявление к разряду полихронных [5; 9].

В представленной статье приведены результаты изучения пород Лицевского рудопроявления и соседнего с ним проявления Приозерное. Для проб, отобранных из рудных зон этих объектов, были определены физические свойства (плотность и показатель упругой анизотропии), содержания урана и тория, определен состав урановых и ториевых минеральных фаз и проведено сопоставление полученных данных для разных участков исследованной территории.

**Геологическое строение Лицевского и Приозерного рудопроявлений. Лицевское рудопроявление урана.** Лицевское рудопроявление урана открыто в 1962 г. в ходе поисковых работ партии № 16 Северной экспедиции. Рудопроявление размещается среди мигматитизированных биотитовых, мусковит-биотитовых и глиноземистых гнейсов кольской серии и локализовано на пересечении Лицевского, Чептьярского и Урдозерского глубинных разломов (рис. 1, а) в зоне динамического влияния Лебяжинского гранитного массива [9]. В географическом плане Лицевское рудопроявление расположено рядом со станцией 90-й км железной дороги Мурманск–Печенга (рис. 1, б). Активное изучение Лицевского рудопроявления началось в 1970-е годы силами ГП «Невскеология» с применением геологических и геофизических методов исследований, включая горные работы (расчистки обнажений, проходка канав и шурфов), а также бурения.

В результате проведения аэро- и наземной гаммасъемки в непосредственной близости от Лицевского рудопроявления были выявлены проявления Западно-Лицевское, Восточно-Лицевское, Приозерное и Гнездовое, а также урановые аномалии группы Моккет (рис. 1, б). Из них лучше всего изучено Западно-Лицевское проявление. Оно локализовано в амфибол-гранат-магнетитовых сланцах, рассеченных пегматоидной жилкой, состоящей из микроклина, плагиоклаза, кварца и мелкочешуйчатого биотита, который составляет до 50% объема породы. Аномально высокая радиоактивность, достигающая в отдельных точках 2000 мкР/ч, связана с пегматитовой жилкой и приурочена к участкам, обогащенным биотитом, монацитом и ортитом, а также к сланцам из приконтактных зон. Радиоактивная минерализация представлена монацитом, уранинитом, гуммитом. Содержание урана варьирует от 0,014 до 0,066%.

Полевые исследования 2022 г. ГИ КНЦ РАН по изучению проявлений Западно-Лицевское, Восточ-

но-Лицевское, Моккет, Гнездовое (рис. 1, б) были затруднены, т. к. старые расчистки, вскрывающие выходы коренных горных пород, за многие годы заросли, что не позволило собрать каменный материал для выполнения лабораторных исследований. Основной объем полевых работ был проведен на участках Лицевского рудопроявления и проявления Приозерное, входящих в состав рудного узла.

В пределах урановорудных объектов Лицевского рудного узла отмечено проявление двух типов урановой минерализации: ранней торий-урановой в кварц-полевошпатовых метасоматитах и поздней урановой в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах [9].

Ранняя минерализация связана с телами ураноносных кварц-полевошпатовых метасоматитов, залегающих согласно с гнейсовидностью вмещающих гнейсов и сконцентрированных в виде полос мощностью до 60 м и протяженностью до 700 м. Рудная минерализация представлена уранинитом, браннеритом и торитом. Среди сульфидов отмечаются молибденит, пирит и халькопирит, среди окислов – магнетит. Урановые минералы сопровождаются апатитом и турмалином, иногда флюоритом. Урановая минерализация кварц-полевошпатовых метасоматитов имеет гнездово-вкрапленный и, редко, линзовидный характер. Максимальные размеры линз с содержанием урана свыше 0,01% составляет 0,5 × 5,0 м. В гнездобразных выделениях содержание урана достигает 0,1–0,15%; содержание тория составляет 0,03–0,05%. Подобный характер минерализации отмечается до глубин 300–400 м [9].

Возраст ранней минерализации определен U-Pb методом по ураниниту и браннериту из кварц-полевошпатовых метасоматитов в 1,85–1,75 млрд лет [9] и Rb-Sr методом по биотиту в  $1890 \pm 39$  млн лет [6]. Температура гомогенизации флюидных включений в кварце и температура закрытия Rb-Sr системы биотита определяет температуру формирования торий-урановой минерализации первого этапа в 300–350 °C [9].

Поздняя урановая минерализация представлена преимущественно настураном и коффинитом, редко – уранинитом. Характер распределения настурана и коффинита – прожилковый, прожилково-вкрапленный, гнездово-вкрапленный. Отмечается широкое развитие гидроокислов и вторичных урановых минералов (казолит, уранофан, склодовскит, ургит, скупит и др.), развитых в виде пленок и корочек на стенках трещин. Среди аксессуаров отмечены флюорит, апатит и циркон.

Сульфиды представлены преимущественно пиритом, халькопиритом и пирротинном, а также галенитом и сфалеритом. Наиболее древним является пирит, который образует преимущественно крупные кристаллы кубической формы, зачастую катаклазированные. Среди окислов преобладают гематит и рутил.

Урановое оруденение контролируют зоны дробления и интенсивной тектонической трещиноватости, где широко развиты альбит-гидрослю-

дисто-хлоритовые метасоматиты. Зоны эпигенетически преобразованных пород прослежены по простиранию на 300–400 м при мощности 40–50 м. Рудные тела залегают в телах метасоматитов в виде пологонаклонных линз и штокверков. Протяженность рудных тел колеблется от первых метров до десятков метров при мощности от первых сантиметров до 30–40 м. Содержание урана в рудных залежах варьирует от 0,01 до 0,4%; содержание тория не превышает 0,02%. Величина Th/U составляет 0,1 [9].

Возраст поздней урановой минерализации определен U-Pb методом по настурану из прожилков в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых мета-

соматитах и составляет 390–370 млн лет [7; 9]. Возраст настурана из коффинит-настуранового прожилка определен SHRIMP-II методом и составляет  $420 \pm 20$  млн лет [12]. Альбит-гидрослюдисто-хлоритовые метасоматиты, согласно минеральным реакциям и гомогенизации флюидных включений, были образованы в температурном интервале 205–220 °C [2; 6; 8].

В целом участок Лицевского рудопроявления сложен мигматизированными в различной степени биотитовыми (мусковит-биотитовыми, гранат-биотитовыми) и глиноземистыми (кордиерит-биотитовыми, силлиманит-биотитовыми) гнейсами кольцевой серии архея (рис. 2, рис. 3, а).

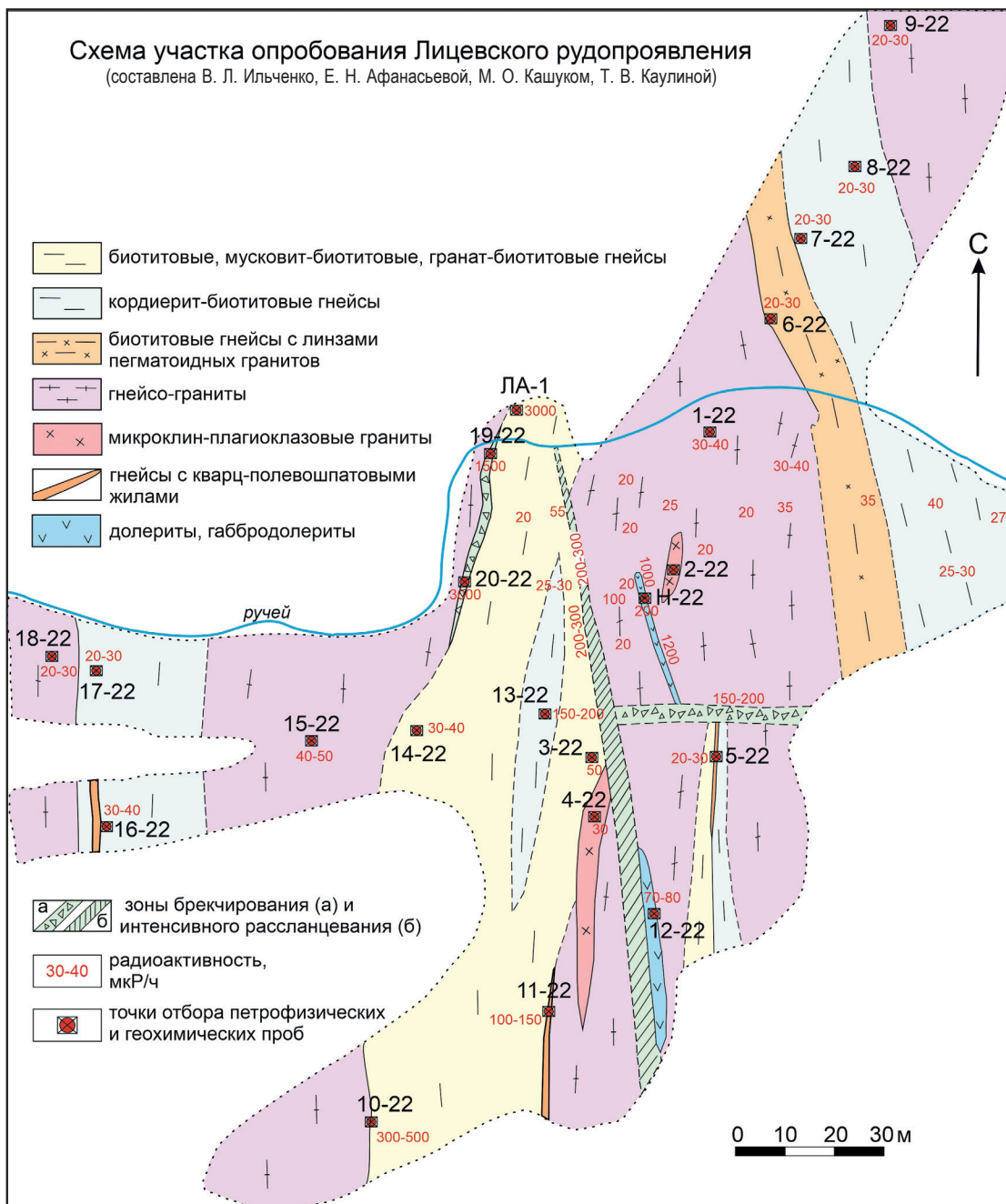


Рис. 2. Схема геологического строения Лицевского рудопроявления с точками отбора образцов

В гнейсах отмечены маломощные (25–40 см) жилы и прожилки кварц-полевошпатового состава субогласные со сланцеватостью вмещающих пород, непрерывно прослеженные по простиранию на 15–20 м (рис. 3, б). Гнейсы перемежаются с телами гнейсогранитов и гранитов (лейко- и плагиограниты, микроклиновые граниты). Отмечаются выходы даек долеритов и габбродолеритов северо-западного простирания, прослеженные по простиранию на 35–40 м при ширине до 5 м (рис. 3, в). Контакты с вмещающими гнейсами сильно окислены и рассланцованы. Возраст даек, по данным Rb-Sr датирования, составляет около 1 млрд лет [12].

Общий радиоактивный фон пород составляет 20–30 мкР/ч. Радиоактивные аномалии с аномально высокими значениями (до 1500–3000 мкР/ч и более) приурочены к зонам интенсивного рассланцевания и брекчирования пород, контактам с долеритовыми дайками, где вмещающие гнейсы рассланцованы с образованием шир-зон и окислены, а также к прожилкам настурана, выполняющим центральные части секущих биотитовые гнейсы кварц-полевошпат-мусковитовых жил (рис. 2).

**Приозерное проявление урана.** Проявление Приозерное расположено примерно в 1,5 км к северо-востоку от Лицевского рудопроявления (рис. 1, б). Здесь урановородные тела вскрыты тремя расчистками размером ~ 10 × 15 м (рис. 4). Они размещаются среди мигматизированных биотит-мусковитовых и глиноземистых гнейсов и микроклин-плагиоклазовых гранитов, характеризующихся радиоактивным фоном 30–40 мкР/ч. Повышение радиоактивности (150–200 мкР/ч до 500 мкР/ч) контролируется зонами гидрослюдизации, гематитизации и окварцевания, проявленными среди биотитовых гнейсов, гранитов и плагиогранитов. Из зон изменений с повышенным и аномальным значением радиоактивности были отобраны образцы для проведения дальнейших лабораторных исследований.

По данным ГП «Невскгеология», урановая минерализация на проявлении Приозерное представлена уранинитом, образующим гнездообразные скопления размером до 1–2 мм в диаметре; отмечены пленки казолита на стенках трещин. Содержание урана в породах из рудоносных зон варьирует от 0,007–0,009 до 0,088–0,23%, тория – от 0,011 до 0,075%.

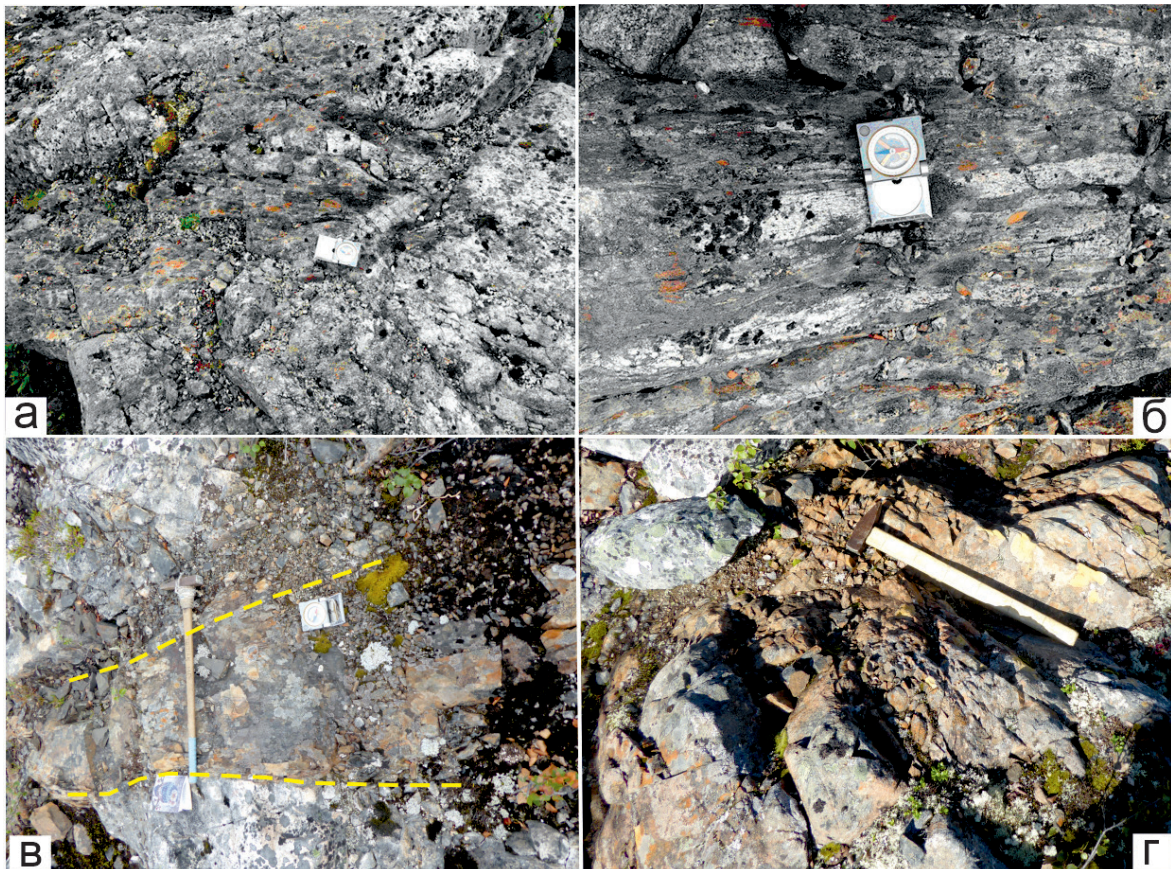


Рис. 3. Породы Лицевского рудопроявления:

а – коренное обнажение биотитовых гнейсов, б – кварцевые жилы и прожилки в гнейсах, в – дайка мелкозернистых долеритов, г – долериты дайки рассланцованные

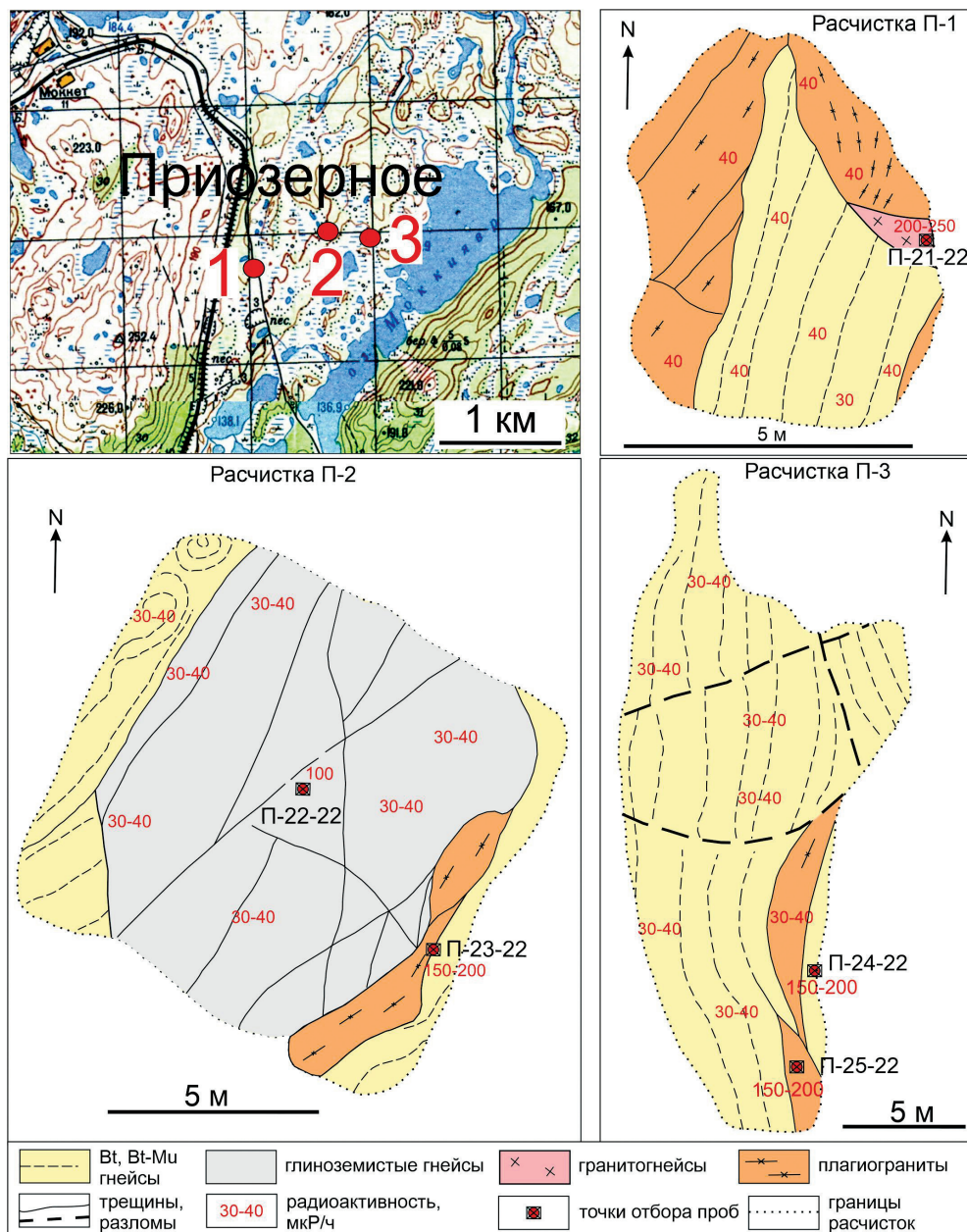


Рис. 4. Проявление Призерное. Схемы расположения расчисток с элементами геологического строения и точками отбора образцов

**Методика исследований. Физические свойства (петрофизика) пород.** Для проведения петрофизических измерений из отобранных проб были выпилены образцы кубической формы. Скорость распространения продольных волн  $V_p$  измерялась в трех направлениях куба с помощью ультразвукового прибора ГСП УК-10ПМС.

Коэффициент анизотропии  $A$  образцов вычислен из скоростей распространения в образцах ультразвуковых продольных волн ( $V_1, V_2, V_3$ ) в трех ортогональных направлениях по формуле:

$$A = 1/V_{cp} \times ((V_1 - V_{cp})^2 + (V_2 - V_{cp})^2 + (V_3 - V_{cp})^2)^{0.5} \times 100\%,$$

где  $V_{cp} = (V_1 + V_2 + V_3)/3$  – средняя скорость распространения продольных волн в образце.

Плотность ( $\rho$ ) образцов измерена гидростатическим взвешиванием (метод Архимеда), т. е. путем взвешивания образцов в воздухе и воде с последующим расчетом по формуле:

$$\rho = \rho_e m_1(m_1 - m_2) \text{ г/см}^3,$$

где  $\rho_e$  – плотность воды ( $=1 \text{ г/см}^3$ ),  $m_1$  – масса образца в воздухе, численно равная весу, а  $m_2$  – масса образца в воде.

Измерения проводились на лабораторных весах ВЛКТ–500г–М, модернизированных для измерения массы в воде. Погрешность измерений не превышала  $\pm 20$  мг соответственно, что обеспечило погрешность определения  $\rho$  не более  $\pm 0,005 \text{ г/см}^3$ .

**Геохимия пород.** Валовые анализы пород на содержание U и Th проводились методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А. П. Карпинского (Институт Карпинского). Относительная погрешность определения элементов не превышает 5–10%.

**Электронная микроскопия.** Определение уран- и торийсодержащих минеральных фаз проводилось полуколичественным методом в аншлифах на электронном сканирующем микроскопе LEO-1450, Carl Zeiss AG с энергодисперсионной приставкой Aztec UltimMax 100 (Oxford Instruments, Oxford, UK) в ГИ КНЦ РАН.

**Результаты. Исследования физических свойств пород (петрофизика).** Результаты исследований физических свойств пород рудопроявлений Лицевское и Приозерное (плотность, средняя скорость продольных волн, показатель упругой анизотропии, а также радиоактивность пород в точке отбора по результатам полевых определений с радиометром) представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Радиоактивность пород, отобранных из зоны брекчирования на Лицевском рудопроявлении, менялась от фоновых значений в 20–30 мкР/ч до максимальных значений – 3000 мкР/ч и выше (образцы 19-22, 20-22 и ЛА-1/22, рис. 2, табл. 1). Значения радиоактивности для пород проявления Приозерное существенно ниже и не превышали 200 мкР/ч.

Плотность изученных образцов варьирует от 2,56 до 3,39 г/см<sup>3</sup> (табл. 1) как для образцов Лицевского, так и Приозерного рудопроявлений. Все образцы исследованной коллекции, кроме двух образцов долерита и габбродолерита, относятся к гранитоидам или другим породам кислого состава, плотность которых, по справочным данным, обычно находится в интервале  $2,65 \pm 0,1$  г/см<sup>3</sup>. Кроме образца долерита (Н-1/22), повышенная плотность отмечается у сильно радиоактивных образцов (13-22, 19-22, 20-22 и ЛА-1/22). Для проявления Приозерное средняя плотность образцов (2,88 г/см<sup>3</sup>) также немного выше типичной для гранитоидов, что можно объяснить присутствием в породах заметного количества окислов железа (образцы имеют «ржавый» оттенок).

Средняя скорость продольных волн для всех пород находится в пределах 2,55–4,80 км/с. При этом коэффициент упругой анизотропии существенно меняется от образца к образцу от минимального значения 0,69% в граните Лицевского рудопроявления (образец 4-22) до 57,3% в глиноземистом гнейсе рудопроявления Приозерное (образец П22-22) (табл. 1). На Лицевском рудопроявлении на участках пород с низким радиоактивным фоном, где не проявлена урановая минерализация, анизотропия пород, за редким исключением, достаточно высокая: до 47,7% (рис. 5, а). Там, где радиоактивный фон повышен, коэффициент анизотропии варьирует от низких

(2,28%) до высоких (40,3%) значений (рис. 5, б). На участке Приозерное анизотропия пород повышается до 57,3% при относительно невысокой радиоактивности.

Петрографическое изучение пород в шлифах показало, что вмещающие рудные тела биотитовые и глиноземистые гнейсы Лицевского и Приозерного рудопроявлений претерпели интенсивные гидротермально-метасоматические преобразования. Первая стадия изменений выражается в частичной или полной хлоритизации биотита. На следующей стадии наблюдается развитие хлорита по плагиоклазу, замещение кварца хлоритом, альбитизация и серицитизация плагиоклаза. В породах широко проявлены процессы перекристаллизации с замещением первичных зерен плагиоклаза и кварца агрегатом мелких (перекристаллизованных) зерен. Явление неоднородного, волнистого погасания зерен кварца во многих породах, как и мозаичное распадение зерен кварца, представляет собой проявление микродеформаций, возникающих в кристаллической структуре кварца в процессе динамометаморфизма.

**Содержание U и Th в породах.** В табл. 2 и на рис. 5 приведены содержания урана и тория в образцах с повышенным радиоактивным фоном из разных типов пород.

**Урановые и ториевые минералы.** Урановая и ториевая минерализация была изучена в образце ЛА-1/22, отобранного из зоны контакта биотитового гнейса с кварц-полевошпатовой жилкой, содержащей настурановые прожилки. В образце обнаружено большое разнообразие минералов, содержащих радиоактивные элементы: торбернит (медноурановая слюдка –  $\text{Cu}[\text{UO}_2]_2[\text{PO}_4]_2 \times 10(12-18)\text{H}_2\text{O}$ ), торит ( $\text{ThSiO}_4$ ), коффинит ( $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ ), уранинит ( $\text{UO}_2$ ), уранофан ( $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), монацит-(Ce), циркон, апатит, рутил. Все минералы относительно мелкие – до 30 мкм, образуют сростания и кластеры и расположены в основном в хлорите, заместившем биотит, или в плагиоклазе (рис. 6).

Исходя из изучения аншлифов, первичная минерализация представлена Th-U типом. В гнейсах часто встречаются изолированные зерна торбернита в хлорите, заместившем биотит, и каймы торбернита вокруг сростков монацита (Ce), циркона и апатита (рис. 6, поля 1 и 4). Отмечаются кластеры замещения/совместного роста торита, торбернита и рутила (рис. 6, поле 7). Появляется уранофан, развивающийся по сросткам циркона и фторапатита (поле 8), и уранинит, образующий каймы по халькопириту (поле 14-1). Отмечены оксиды урана с повышенным содержанием As, Fe, Cu. Сульфиды представлены только пиритом и халькопиритом, редко отмечены окислы железа. Обнаружено зерно халькопирита с включениями коффинита-I с галенитом и каймами уран-итриевой силикатной фазы (поле 14-2). В нижней рудной зоне (рис. 6, а, поля 15-27) отмечены совместные зоны развития уранинита, уранофана и коффинита-II (рис. 6, поля 24 и 25).

Таким образом, последовательность образования минеральных фаз следующая: первая

Физические свойства образцов пород, отобранных на рудопроявлениях Лицевское и Приозерное

Образец	Порода (состав)	Радио-активность, мR/h	Плотность, г/см <sup>3</sup>	V <sub>ср</sub> , км/с	Показатель упругой анизотропии А, %
1-22	Плагиогранит кр/з (Pl, Qz, Bt+Chl*)	30–40	2,60	4,80	4,46
2-22	Гранит кр/з (Pl, Mc, Qz)	20	2,61	4,17	28,0
3-22	Bt гнейс ср/з (Pl, Qz, Bt)	50	2,69	3,60	18,3
4-22	Гранит кр/з (Pl, Mc, Qz, Bt)	30	2,59	4,31	0,69
5-22	Bt гнейс на контакте с Cord-Bt гнейсом (м-ср/з)	20–30	2,68	3,54	31,2
6-22	Grt-содержащий Bt гнейс с Qz-Fsp прожилками ср-м/з	20–30	2,72	3,88	47,7
7-22	Bt гнейс с Cord ср-м/з	20–30	2,65	3,43	38,1
8-22	Cord-Bt гнейс ср-м/з	20–30	2,71	3,94	37,6
9-22	Гранитогнейс м-ср/з (Pl, Mc, Qz Bt,)	20–30	2,56	3,63	4,82
10-22	Контакт ср/з плагиогранита с Amf-Bt гнейсом	300–500	2,69	4,40	27,3
11-22	Bt гранитогнейс м-ср/з	>100	2,77	3,57	10,3
12-22	Дайка габбро-долерита ср/з (Pl, Px, Amf, Bt)	70–80	2,78	3,77	2,28
13-22	Bt гнейс с Cord м/з	150–200	2,97	3,72	29,1
14-22	Bt гнейс ср-кр/з (Pl, Qz, Mc, Bt+Chl)	30–40	2,89	3,14	16,9
15-22	Лейкогранит ср/з (Pl, Mc, Qz)	40–50	2,89	3,55	12,2
16-22	Bt гнейс с Cord ср/з (Pl, Qz, Bt+Chl, Cord)	30–40	2,92	4,07	23,5
17-22	Bt гнейс с Cord ср/з (Pl, Qz, Bt+Chl, Cord)	20–30	2,94	3,81	38,5
18-22	Гранит м-ср/з (Mc, Pl, Qz, Bt)	20–30	2,84	3,42	14,7
19-22	Плагиогранит ср/з (Pl, Qz, Bt)	1500	3,01	2,55	3,84
20-22	Контакт Му-Bt гнейса с плагиогранитом, ср/з	3000	3,19	3,41	22,3
ЛА-1/22	Контакт Bt гнейса с Qz-Fs ± Му жилой, м/з	>3000	3,39	4,54	6,42
Н-1/22	Дайка долерита, м/з (Pl, Px, Amf, Bt, Chl)	100–200	3,05	3,45	40,3
П21-22	Гранитогнейс ср-кр/з (Pl, Mc, Qz, Bt)	100–150	2,87	3,92	17,6
П22-22	Bt гнейс с Sill и Му, ср-м/з	100	2,94	4,12	57,3
П23-22	Плагиогранит кр/з (Pl, Bt, Qz)	150–200	2,80	2,94	24,0
П24-22	Му-Bt гнейс, м/з	150–200	2,97	3,89	47,5
П25-22	Пегматоидный плагиогранит (Pl, Qz)	100	2,84	4,15	28,6

\* Аббревиатура минералов здесь и далее по [13].

минерализация связана с развитием ториевых и урановых минералов – монацит-(Ce), циркон, торбернит, торит, коффинит-I. Затем появляются сульфидные минералы – пирит и халькопирит. На заключительной стадии развивается вторая урановая минерализация, представленная уранинитом, уранофаном, оксидами урана, коффинитом 2-й генерации.

**Обсуждение.** В целом рудная минерализация Лицевского района связана с зонами повышенной трещиноватости, катаклаза и брекчирования, как

наиболее проницаемыми для гидротермальных флюидов, поэтому породы, содержащие урановую минерализацию, должны быть высокоанизотропны, что не всегда выдерживается для Лицевского рудопроявления. Петрофизические и геохимические исследования, проведенные на небольшом участке рудопроявления в 2018 г. [6], показали, что физические свойства пород (показатель упругой анизотропии) отражают разные типы уранового оруденения, и фактором, снижающим упругую анизотропию пород, являются процессы мигматизации и гидротермальной рудной

минерализации. Был сделан вывод, что первая Th-U минерализация с образованием монацита, циркона и уранинита не приводила к снижению показателя анизотропии пород, поскольку минералы образовывали изолированные зерна в породе. Напротив, урановая минерализация, проявленная в палеозое, с образованием настурана, коффинита и вторичных урановых минералов, снижала анизотропию пород, заполняя порово-трещинное пространство.

Результаты 2022 г., полученные с существенно расширенной площади участка опробования Лицевского рудопроявления, показали, что все участки с повышенным радиоактивным фоном расположены в зоне брекчирования, трещиноватости и граничных породных ассоциаций. При этом образцы с самым высоким радиоактивным фоном и повышенным содержанием урана (20-22, ЛА-1/22, 19-22) характеризуются очень низкой упругой анизотропией (рис. 5, б).

Плотность пород также меняется в зависимости от уровня радиоактивности и степени вторичной минерализации. При средней плотности образцов в 2,5–2,7 г/см<sup>3</sup> существенно возрастает плотность радиоактивных образцов с урановой и ториевой минерализацией (19-22, 20-22, ЛА-1/22) и образцов, обогащенных сульфидами и окислами железа (породы проявления Приозерное).

В целом проведенные петрофизические и геохимические исследования на рудопроявлениях Лицевское и Приозерное подтвердили вывод о существовании корреляции петрофизических характеристик пород (пространственного распределения показателя упругой анизотропии и плотности) с уровнем радиоактивного фона (и содержанием урана) и типом минерализации. Если сравнить распределение радиоактивности (рис. 7, а) и показателя упругой анизотропии (рис. 7, б) по площади Лицевского рудопроявления, то можно сказать, что упругая анизотропия пород в отсутствие рудной минерализации отражает петрографические свойства пород (структуру, текстуру, размер зерен, трещиноватость и т. д.) или границы раздела пород (рис. 7, б). При наличии рудной минерализации упругая анизотропия пород отражает степень интенсивности минерализации, то есть степень заполнения пор и трещин.

Петрографическое изучение показывает, что в породах широко развиты процессы замещения (биотита – хлоритом, альбитизация и серицитизация плагиоклаза и т. д.) и перекристаллизации (замещение плагиоклаза и кварца мелкозернистыми агрегатами), что свидетельствует о проявлении метасоматических процессов и характерно для урановорудных районов.

Изучение урановых и ториевых фаз в породах Лицевского рудопроявления показало наличие двух этапов образования урановорудной минерализации. Первый этап связан с развитием монацит-(Се), циркона, торбернита, торита, коффинита-I. Затем развиваются сульфидные

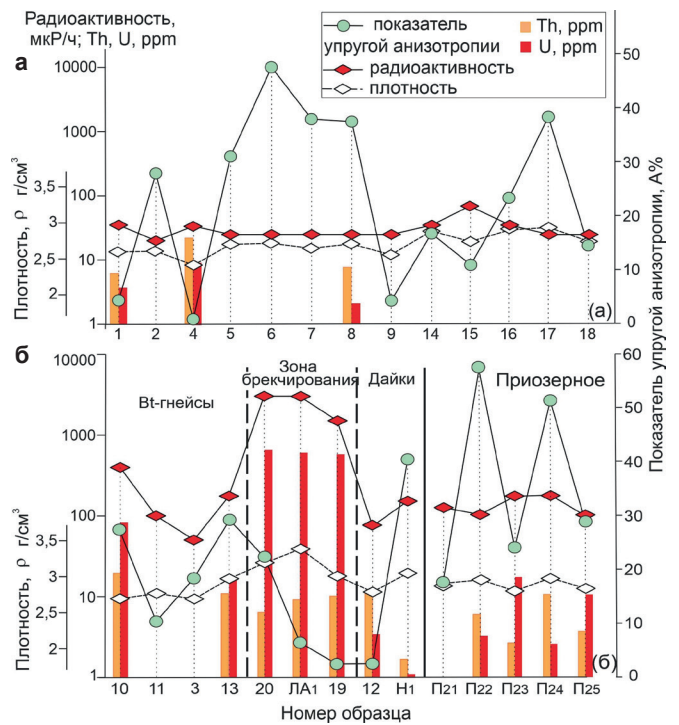


Рис. 5. Физические свойства пород на рудопроявлениях Лицевское и Приозерное

На рисунках (а) и (б) показаны образцы с низким (а) и высоким (б) радиоактивным фоном

минералы – пирит и халькопирит. На следующей стадии образуется вторая урановая минерализация, представленная уранинитом, уранофаном, оксидами урана, коффинитом 2-й генерации. Присутствие

Таблица 2

Содержания U и Th в породах рудопроявлений Лицевское и Приозерное

№ п/п	Проба	Порода	U, ppm	Th, ppm
1	1-22	Плагиогранит	3,68	6,20
2	4-22	Гранит	9,02	18,5
3	8-22	Cord-Bt гнейс	2,04	7,46
4	10-22	Плагиогранит	85,7	19,9
5	12-22	Габбродолерит	3,40	11,1
6	13-22	Vt гнейс с Cord	15,9	10,7
7	19-22	Плагиогранит	597	10,2
8	20-22	Му-Bt гнейс	683	6,42
9	ЛА-1/22	Qz-Fs-Му жила	629	9,25
10	Н-1/22	Долерит	1,08	1,69
11	П22-22	Vt гнейс с Sill	3,22	6,04
12	П23-22	Плагиогранит	17,6	2,64
13	П24-22	Му-Bt гнейс	2,61	10,8
14	П25-22	Пегматоидный плагиогранит	10,8	3,75

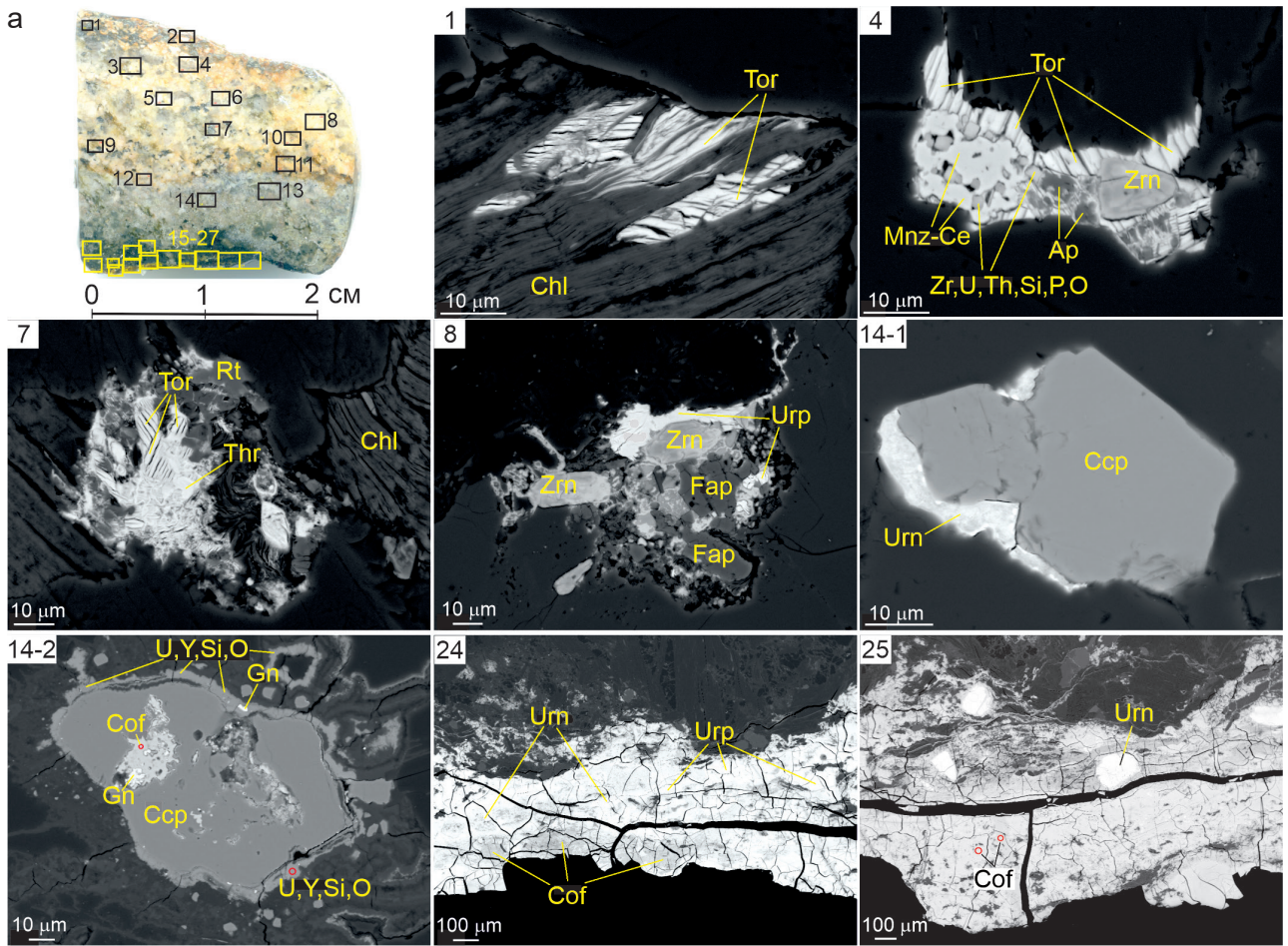


Рис. 6. Включения урановых и ториевых минеральных фаз в образце из зоны контакта биотитового гнейса с кварц-полевошпатовой жилей, содержащей урановую минерализацию

а – фото аншлифа в отраженном свете с полями SEM анализов, кадры 1–25 – фото SEM, BSE. Аббревиатуры минералов: Tor – торбернит, Thr – торит, Urn – уранинит, Urp – уранофан, Cof – коффинит, Rt – рутил, Ap – апатит, Mnz-(Ce) – монацит-(Ce), Zm – циркон, Ccp – халькопирит, Py – пирит, Gn – галенит, Chl – хлорит

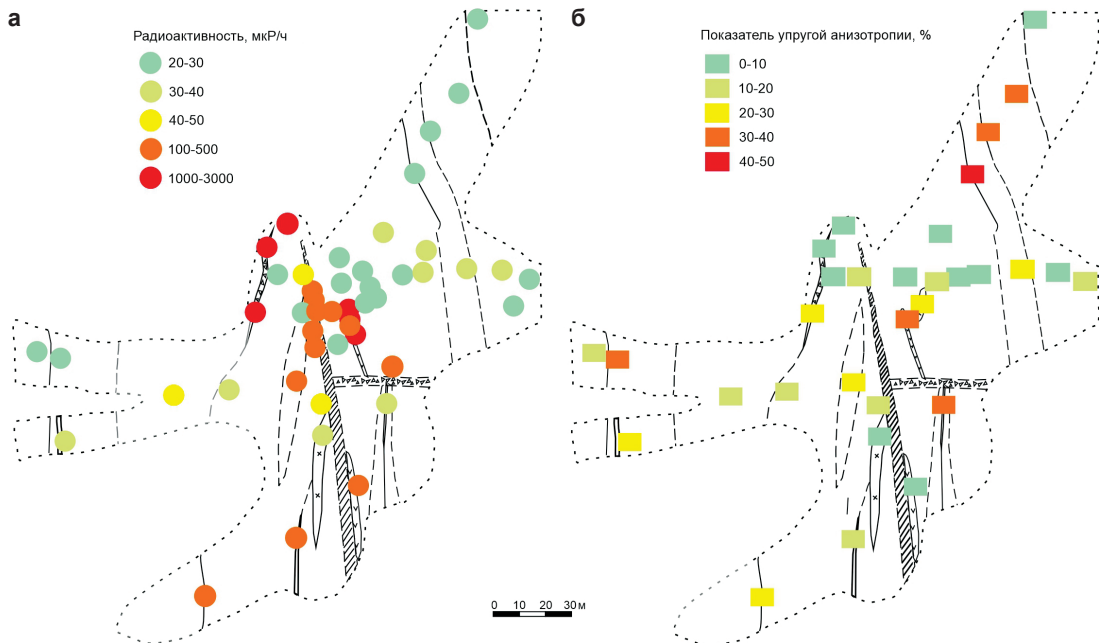


Рис. 7. Сравнительная схема распределения радиоактивности и показателя упругой анизотропии для пород Лицевского рудопоявления

коффинита двух генераций отмечали и предыдущие исследователи [12].

Проведенный минералогический анализ согласуется с геологическими данными Савицкого А. В. [9] о наличии двух этапов минерализации на Лицевском рудопроявлении: ранней Th-U и поздней – U. Оба типа минерализации обнаружены в одной породе, что подтверждает эффект «телескопирования», характерного для гидротермальных урановых рудопроявлений, то есть развития разновозрастной урановой минерализации в одних и тех же структурах [11].

**Заключение.** Для рудопроявлений Лицевское и Приозерное проведено изучение петрофизических, геохимических и минералогических свойств пород в образцах, отобранных в ходе полевых работ, проведенных в 2022 г. Был расширен участок опробования пород на Лицевском рудопроявлении по сравнению с более ранними исследованиями, также были опробованы и задокументированы расчистки, вскрывающие горные породы на проявлении Приозерное.

Петрографическое изучение пород Лицевского и Приозерного рудопроявлений показало, что они претерпели интенсивные гидротермально-метасоматические преобразования, выраженные в замещении биотита и плагиоклаза хлоритом, а также в альбитизации и серицитизации плагиоклаза. В породах широко развиты процессы перекристаллизации первичных плагиоклаза и кварца с уменьшением размера зерен.

Плотность и показатель упругой анизотропии пород отражают интенсивность проявления рудной минерализации. Отмечена высокая плотность (3,39 г/см<sup>3</sup>) и низкая упругая анизотропия (2,3%) у образцов пород с урановой и сульфидной минерализацией. На участках развития пород с низкой радиоактивностью упругая анизотропия за редким исключением высокая (до 47,7%), на участках с высокой радиоактивностью – показатель анизотропии снижается до 2,28%. Сравнение площадного распределения показателя упругой анизотропии и радиоактивности в районе Лицевского рудопроявления показывает, что при отсутствии рудной минерализации значение показателя упругой анизотропии отражает петрографические свойства пород (структуру, трещиноватость, границы пород и пр.); при наличии рудной минерализации – степень ее интенсивности, то есть степень заполнения пор и трещин.

Изучение урановых и ториевых фаз в породах Лицевского рудопроявления показало наличие двух этапов образования урановорудной минерализации Th-U и U, разделенных образованием сульфидных минералов (пирит и халькопирит).

Проведенными исследованиями рудопроявлений Лицевского урановорудного района получены новые данные по петрофизическим, геохимическим и минералогическим особенностям пород, вмещающих урановорудные объекты, что может быть использовано при оценке потенциальной рудоносности территорий с проявлением

многостадийных гидротермально-метасоматических преобразований.

Работа выполнена в рамках Госзадания ГИ КНЦ РАН, тема НИР FMEZ-2022-0025.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Е. Н., Миронов Ю. Б. Металлогения урана Балтийского щита // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 10. – С. 82–88.
2. Виноградов А. Н., Виноградова Г. В., Припачкин В. А. Условия формирования натровых метасоматитов в зонах палеозойской тектоно-гидротермальной активизации северо-восточной части Балтийского щита. Метасоматоз и метасоматиты в метаморфических комплексах докембрия. – Апатиты : КФАН СССР, 1981. – С. 105–110.
3. Казанский В. И. Эволюция рудоносных структур докембрия. – М. : Недра, 1988. – 247 с.
4. Казанский В. И., Лобанов К. В. О границах и металлогении Печенгского рудного района // Геология рудных месторождений. – 1996. – № 1. – С. 103–109.
5. Казанский В. И., Лобанов К. В., Кузнецов А. В. Объемная геологическая модель Печенгского рудного района / ред. Н. В. Шаров // Сейсмологическая модель литосферы северной Европы: Лапландско-Печенгский район. – Апатиты : КНЦ РАН, 1997. – С. 157–181.
6. Лицевское рудопроявление урана (Арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые результаты петрофизических и геохимических исследований / В. Л. Ильченко, Е. Н. Афанасьева, Т. В. Каулина, Л. И. Лялина, Е. А. Ниткина, О. Д. Мокрушина // Записки Горного института. – 2022. – Т. 255. – С. 393–404.
7. Оценка перспектив ураноносности Кольского п-ва и выделение площадей для поисков промышленного уранового оруденения / Б. В. Петров, Л. К. Володченко, М. Г. Павлов и др. – Л. : ВСЕГЕИ, 1975. – 436 с.
8. Региональные метаморфо-метасоматические формации. Принципы и методы оценки рудоносности геологических формаций / Г. М. Беляев, Б. А. Блюман, Ю. Е. Вишневская, В. Е. Жданов, В. К. Кузьмин, А. Т. Маслов, Б. В. Петров. – Л. : Недра, 1983. – 280 с.
9. Урановое оруденение Лицевского района на Кольском полуострове (Россия) / А. В. Савицкий, Ю. А. Громов, Е. В. Мельников, П. И. Шариков // Геология рудных месторождений. – 1995. – № 5. – С. 403–416.
10. Ураноносность Кольского полуострова / Е. Н. Афанасьева, В. А. Михайлов, Л. В. Былинская, А. А. Липнер, Л. В. Серов // Информационный сборник «Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов». – М. : ВИМС, 2009. – Вып. 153. – С. 18–26.
11. Щербина В. В. и др. Основные черты геохимии урана / Г. Б. Наумов, Е. С. Макаров, В. И. Герасимовский, Н. П. Ермолаев, М. С. Тарасов, А. И. Тугаринов, В. Л. Барсуков, Н. Т. Соколова, А. В. Коченов, А. И. Германов. – Томск : Из-во СТУ, 2013. – 374 с.
12. Serov L. Métallogenèse de l'uranium dans la région de Litsa (Péninsule de Kola, Russie). Docteur de l'Université Henry Poincaré (en géosciences). – Nancy : Soutenance publique, 2011. – 166 p.
13. Warr L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. – 2021. – Vol. 85, iss. 3. – Pp. 291–320.

## REFERENCES

1. Afanasyeva E. N., Mironov Yu. B. Metallogeniya urana Baltijskogo shchita [Metallogeny of uranium of the Baltic shield]. *Rasvedka i okhrana nedr*, 2015, no. 10, pp. 82–88.

2. Vinogradov A. N., Vinogradova G. V., Pripachkin V. A. Usloviya formirovaniya natrovyykh metasomatitov v zonakh paleozoyskoy tektono-gidrotermal'noy aktivizatsii severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo shchita. Metasomatoz i metasomatity v metamorficheskikh kompleksakh dokembriya [Conditions for the formation of sodium metasomatites in zones of Paleozoic tectono-hydrothermal activation in the northeastern part of the Baltic Shield. Metasomatism and metasomatites in Precambrian metamorphic complexes]. Apatity, KFAN USSR, 1981, pp. 105–110.
3. Kazansky V. I. Evolyutsiya rudonosnykh struktur dokembriya [Evolution of Precambrian ore-bearing structures]. Moscow, Nedra, 1988, 247 p.
4. Kazansky V. I., Lobanov K. V. O granitsakh i metallogenii Pechengskogo rudnogo rayona [On the boundaries and metallogeny of the Pechenga ore district (Baltic Shield)]. *Geology of Ore Deposits*, 1996, no. 1, pp. 103–109.
5. Kazansky V. I., Lobanov K. V., Kuznetsov A. V. Ob"emnaya geologicheskaya model' Pechengskogo rudnogo rayona [Volumetric geological model of the Pechenga ore region]. Ed. by N. V. Sharov. Seismological model of the lithosphere of northern Europe: Lapland-Pechenga region. Apatity, KSC RAS, 1997, pp. 157–181.
6. Il'chenko V. L., Afanasieva E. N., Kaulina T. V., Lyalina L. M., Nitkina E. A., Mokrushina O. D. Litsevskoe rudoproyavlenie urana (Arkticheskaya zona Fennoskandinskogo shchita): novye rezul'taty petrofizicheskikh i geokhimicheskikh issledovaniy [Litsa uranium ore occurrence (Arctic zone of the Fennoscandian Shield): new results of petrophysical and geochemical studies]. *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 2022, vol. 255, pp. 393–404.
7. Petrov B. V., Volodchenko L. K., Pavlov M. G. et al. Otsenka perspektiv uranonosnosti Kol'skogo p-va i vydele-nie ploshchadey dlya poiskov promyshlennogo uranovogo orudneniya [Assessment of uranium potential prospects of the Kola Peninsula and allocation of areas for prospecting for industrial uranium mineralization]. Leningrad, VSEGEI, 1975, 436 p.
8. Belyaev G. M., Bluman B. A., Vishnevskaya Yu. E., Zhdanov V. E., Kuzmin V. K., Maslov A. T., Petrov B. V. Regional'nye metamorfo-metasomaticheskie formatsii. Printsipy i metody otsenki rudonosnosti geologicheskikh formatsiy [Regional metamorpho-metasomatic formations: Principles and methods for assessing the ore content of geological formations]. Leningrad, Nedra, 1983, 280 p.
9. Savitsky A. V., Gromov Yu. A., Melnikov E. V., Sharikov P. I. Uranovoe orudnenie Litsevskogo rayona na Kol'skom poluostrove (Rossiya) [Uranium mineralization of the Litsevsky region on the Kola Peninsula (Russia)]. *Geology of Ore Deposits*, 1995, no. 5, pp. 403–416.
10. Afanasyeva E. N., Mikhailov V. A., Bylinskaya L. V., Lipner A. A., Serov L. V. Uranonosnost' Kol'skogo poluostrova [Uranium content of the Kola Peninsula]. *Information collection «Materialy po geologii mestorozhdeniy urana, redkikh i redkozemelnykh metallov»*. Moscow, VIMS, 2009, iss. 153, pp. 18–26.
11. Shcherbina V. V., Naumov G. B., Makarov E. S., Gerasimovskiy V. I., Ermolaev N. P., Tarasov M. S., Tugarinov A. I., Barsukov V. L., Sokolova N. T., Kochenov A. V., Germanov A. I. Osnovnye cherty geokhimii urana [Main features of uranium geochemistry]. Tomsk, STT, 2013, 374 p.
12. Serov L. Métallogenèse de l'uranium dans la région de Litsa (Péninsule de Kola, Russie). Docteur de l'Université Henry Poincaré (en géosciences). Nancy, Soutenance publique, 2011, 166 p.
13. Warr L. N. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 2021, vol. 85, iss. 3, pp. 291–320.

Ильченко Вадим Леонидович – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник<sup>1</sup>. <v.ilchenko@ksc.ru>  
 Афанасьева Елена Николаевна – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник<sup>2</sup>. <elena\_afanasieva@vsegei.ru>  
 Каулина Татьяна Владимировна – доктор геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник<sup>1</sup>. <t.kaulina@ksc.ru>  
 Нерович Людмила Ивановна – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник<sup>1</sup>. <l.nerovich@ksc.ru>  
 Савченко Евгений Элланович – науч. сотрудник<sup>1</sup>. <evsav@list.ru>  
 Кашук Михаил Олегович – инженер<sup>1</sup>. <markul51@mail.ru>

Ilchenko Vadim Leonidovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher<sup>1</sup>. <v.ilchenko@ksc.ru>  
 Afanasieva Elena Nikolaevna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher<sup>2</sup>. <elena\_afanasieva@vsegei.ru>  
 Kaulina Tatiana Vladimirovna – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher<sup>1</sup>. <t.kaulina@ksc.ru>  
 Nerovich Lyudmila Ivanovna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher<sup>1</sup>. <l.nerovich@ksc.ru>  
 Savchenko Evgeny Ellanovich – Researcher<sup>1</sup>. <evsav@list.ru>  
 Kashuk Mikhail Olegovich – Engineer<sup>1</sup>. <markul51@mail.ru>

<sup>1</sup> Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (ГИ КНЦ РАН). Ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209.

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (Институт Карпинского). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

<sup>1</sup> Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences (GI KSC RAS). 14 Ul. Fersman, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209.

<sup>2</sup> A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (Karpinsky Institute). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.