

УРАН-БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ КАРЕЛЬСКОЙ АРКТИКИ И СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ: МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В. И. Иващенко

Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2025 г.

Для цитирования

Иващенко В. И. Уран-благороднометалльное оруденение карельской Арктики и северного Приладожья: минералого-геохимическое сопоставление и перспективы // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 25, № 3. — С. 55—68. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-55-68.

Приведены результаты детального минералого-геохимического изучения и сравнительного анализа золото-урановых проявлений Лагерное и Озерное Арктической зоны Республики Карелия (Куолаярвинская структура) и сходного с ними оруденения Ладожской и Онежской структур. Уточнены их генетические и геохимические особенности. Предложена модель их образования с участием эвапоритов, приразломного метасоматоза и гранитоидного магматизма. На основе выявления и идентификации платинометалльных минеральных фаз в метасоматически измененных черных сланцах проявления Лагерное подтверждена достоверность аналитических данных о высоких содержаниях в них палладия и показана в этом аспекте металлогеническая перспективность Нилуттиярвинской поисковой площади карельской Арктики на благородные металлы и уран.

Ключевые слова: карельская Арктика, докембрий, золото, уран, металлы платиновой группы, селен, щелочно-карбонатные метасоматиты, углеродистые сланцы, эвапориты.

Введение

Территория Арктической зоны России считается перспективной для открытия и освоения месторождений цветных и благородных металлов, но значительная ее часть еще недостаточно изучена, а ее благороднометалльный потенциал не реализован [1; 2]. К слабо изученным в этом аспекте относятся и территория карельской Арктики, где известно более 10 Au-U проявлений [3—7] и одно ранее разрабатывавшееся месторождение золота (Майское), локализованных в Лапландско-Онежском палеопротерозойском зеленокаменном поясе (рис. 1А). В зарубежной его части находятся несколько промышленных Au-U и золоторудных месторождений,

включая Суурикуусикко — крупнейшее по запасам золота (более 200 т) и годовой добыче (~6 т) в Европе. Au-U месторождения Финляндии в пределах этого пояса и проявления аналогичного оруденения в его Куолаярвинской структуре на территории Карелии входят в состав Куусамо-Куолаярвинского металлогенического (Co, Au, U) района [9].

В некоторых Au-U проявлениях Куолаярвинской структуры (рис. 1Б) отмечаются аномально высокие содержания Pd (до 80 г/т), но соответствующие минералы до сих пор не были обнаружены [10], что вызывало сомнения в корректности этих аналитических данных. Также, хотя большинство исследователей, изучавших эти рудопроявления, относили их к щелочно-карбонатным метасоматитам зон разломов, широко распространенных на докембрийских

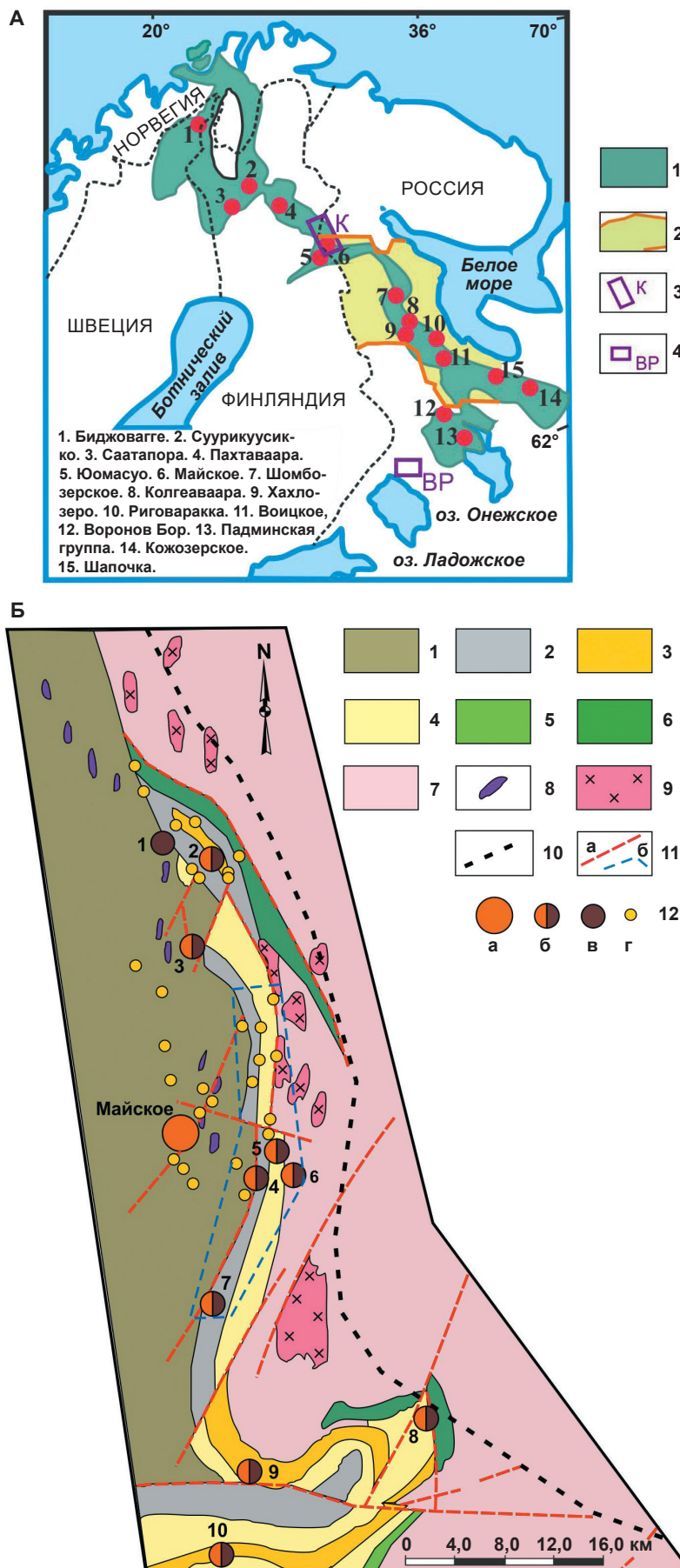


Рис. 1. А. Схема размещения золоторудных месторождений и проявлений в Лапландско-Онежском палеопротерозойском зеленокаменном поясе (по [4; 8] с дополнениями): 1 – Лапландско-Онежский зеленокаменный пояс; 2 – территория Арктической зоны Республики Карелия; 3, 4 – границы районов Карелии, рассматриваемых в статье: 3 – Куоляярвинская структура, 4 – район Виссу-Райконкоски в Ладожской структуре. Б. Схема размещения золоторудных проявлений в Куоляярвинской структуре (по [4] с изменениями): 1, 2 – людиковий: 1 – метабазальты, андезиты и их туфы, 2 – туфоалевролиты, углеродистые сланцы, прослои известняков и доломитов; 3, 4 – ятулий: 3 – метабазальты и их туфы; 4 – песчаники, конгломераты, кварциты, алевролиты, доломиты; 5 – сариолий: андезибазальты, туфо-конгломераты, туфобрекчии, кварцевые порфиры; 6, 7 – архейский фундамент: 6 – биотит-амфиболовые сланцы, амфиболиты, 7 – гнейсы, гранито-гнейсы; 8 – габбро-долериты; 9 – плагиограниты; 10 – граница Восточно-Карельской структурно-металлогенической зоны; 11: а – тектонические нарушения, б – границы Нилуттиярвинской поисковой площади; 12 – месторождения золота (а), рудопоявления золото-урановые (б), урановые (в), пункты минерализации золота (г); нумерация на карте: 1 – Апоярви, 2 – Алим-Курсуярви, 3 – Алакуртти, 4 – Лагерное, 5 – Озерное, 6 – Кварцевое, 7 – Кисиярви, 8 – Сиеппи, 9 – Кайтио, 10 – Альбит-1

Fig. 1. A. Location Scheme of old deposits and occurrences in the Paleoproterozoic Lapland-Onega greenstone belt (according to [4; 8], modified): 1 – Lapland-Onega greenstone belt; 2 – territory of the Arctic zone of the Republic of Karelia; 3, 4 – boundaries of the regions of Karelia considered in the article: 3 – Kuolajärvi structure; 4 – Visu-Raikonkoski area in the Ladoga structure. B. Location Scheme of gold occurrences in the Kuolajärvi structure, according to [4], modified. 1, 2 – Ludicovian: 1 – metabasalts, andesites and their tufts, 2 – tuffaceous siltstones, carbonaceous schists, limestone and dolomites interbeds; 3, 4 – Jatulian: 3 – metabasalts and their tufts; 4 – sandstones, conglomerates, quartzites, siltstones, dolomites; 5 – Sarioian: andesite-basalts, tuff-conglomerates, tuff-breccia, quartz porphyry; 6, 7 – Archean basement: 6 – biotite-amphibole schists, amphibolites, 7 – gneisses, granite-gneisses; 8 – gabbro-dolerites; 9 – plagiogranites; 10 – East Karelian structural-metallogenic zone boundary; 11: a – tectonic dislocations, б – Niluttijärvi prospect boundary; 12 – gold deposits (a), gold-uranium (б), uranium (в) occurrences, gold mineralization points (г); numbering on the map: 1 – Apojärvi, 2 – Alim-Kursujärvi, 3 – Alakurtti, 4 – Lagernoye, 5 – Ozernoye, 6 – Kvarsevnoye, 7 – Kisiyarvi, 8 – Sieppi, 9 – Kautio, 10 – Albite-1

щитах [4; 11; 12], вопросы их генезиса, особенно касающиеся последовательности образования урановой и золотой минерализации и роли углеродистого вещества при этом, оставались недостаточно ясными [13—15]. Это влияло на достоверность оценки прогнозных ресурсов золота и урана в Куолаярвинской структуре, характеризующихся сильной вариативностью: золото по категории РЗ — 18—60 т, уран — до 39 тыс. т [3], что негативно сказывалось на оценочном восприятии металлогенических перспектив этой структуры и соответственно территории карельской Арктики.

Цель данной статьи — на основе результатов детального изучения и сравнительного анализа Au-U проявлений Лагерное и Озерное Куолаярвинской структуры и сходного с ними оруденения южной Карелии в сопоставлении с соответствующими финскими золоторудными месторождениями уточнить их генетические особенности и оценить металлогенические перспективы карельской Арктики на уран-благороднометалльное оруденение.

Материалы и методы

В полевых условиях проводилось изучение строения рудопроявлений, вмещающих пород, структурных элементов, минерального состава, сопровождавшееся минерало-геохимическим опробованием. В камеральный период шлифы и аншлифы, сделанные из отобранных образцов, исследовались методами оптической и электронной микроскопии в Аналитическом центре Института геологии Карельского научного центра РАН по современным стандартным методикам. Микроанализ минералов выполнялся с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (Tescan, Брно, Чехия), оснащенного системой энергодисперсионной спектроскопии (EDS) Energy 350 и детектором SDD X-Act3 (Oxford INCA Energy). Порошковые пробы всех образцов были проанализированы методом ICP MS на квадрупольном масс-спектрометре (X-Series 2 Thermo Fisher Scientific). Определения благородных металлов выполнены пробирным анализом в лаборатории Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов.

Результаты исследований

Уран-благороднометалльные проявления
российской территории Куусамо-Куолаярвинского
металлогенического района

На этой территории известно одно месторождение золота (Майское), несколько Au-U и урановых проявлений и множество пунктов золоторудной минерализации (см. рис. 16). Наиболее изученными из них являются проявления Лагерное и Озерное [4; 16], расположенные в Нилуттиярвинской субмеридиональной тектонической зоне.

Рудопроявление Озерное локализовано в эндо- и экзоконтакте метагаббродолеритов (амфиболитов), залегающих в ятулийских амфибол-биотитовых сланцах вблизи их контакта с углеродистыми сланцами людиновия. Оруденение контролируется сдвиговой зоной северо-восточного простирания (рис. 2), породы в пределах которой подверглись пропилитовым изменениям и щелочно-карбонатному метасоматозу. Прослеженная протяженность зоны — около 500 м, мощность — 60—100 м, падение на северо-запад (50—80°) [4]. Метасоматиты слагают серию кулисообразно расположенных линзовидных тел размером до 15×5 м, центральные части которых имеют кварц-альбит-карбонатный состав и пронизаны кальцитовыми и кварц-анкерит-альбитовыми прожилками, содержащими Au-Te-Se минерализацию. В метасоматитах распространен флогопит ($Fe\#$ 0,23—0,29) и рутил с повышенными содержаниями V (до 2%).

Метасоматически измененные амфиболиты и сланцы содержат прожилково-вкрапленную сульфидную минерализацию (пирит, халькопирит, галенит, пентландит), ильменит и магнетит. Рудная минерализация в альбититах (пирит, марказит, халькопирит, молибденит, кобальтпентландит, Se-содержащий галенит, уранинит, давидит, браннерит и др.) сосредоточена в крупных зернах альбита и в многочисленных различно ориентированных карбонатных прожилках, придающих породе брекчиевидный облик. Молибденит и урановые минералы тяготеют к местам с повышенным содержанием апатита. Уранинит часто ассоциирует с Se-молибденитом (Se до 18%) (рис. 3а), а находясь в альбите, обычно окаймляется хлоритом (рис. 3б). Давидит в такой ассоциации окружен каймой кальцита (рис. 3в). Содержания U в борздовых пробах из альбит-карбонатных метасоматитов достигают 0,1% на 0,5 м, Mo — 0,2% на 0,7 м, Ag — 0,44 г/т, Bi — 14,5 г/т на 0,7 м [4].

Золотая минерализация представлена самородным золотом и сильванитом с размерами зерен 5—30 мкм. Самородное высокопробное ($Ag < 10\%$) золото встречается в виде совместных с алтаитом микропрожилковидных выделений в уранините (рис. 3г) и микровключений в молибдените (рис. 3е). Сильванит ассоциирует с самородным теллуром (рис. 3д) и по данным [16] с алтаитом и мелонитом.

Содержание Au в борздовых пробах из альбит-карбонатных метасоматитов достигает 0,5 г/т на 0,5 м, а максимальные содержания (до 20,5 г/т) установлены в сульфидно-кварцевых жилках, секущих карбонат-альбитовые метасоматиты [4].

Возраст альбититов и развивающихся по ним карбонатных и кварц-анкеритовых метасоматитов (Rb/Sr — 1754 ± 39 млн лет, U/Pb — 1627 ± 42 млн лет) отвечает завершающим стадиям свекофеннской орогении, а перекристаллизации браннерита (U/Pb — 385 ± 2 млн лет) — палеозойской активизации [16], ближайшие связанные с которой щелочные интрузивы находятся в 25—30 км от Озерного проявления.

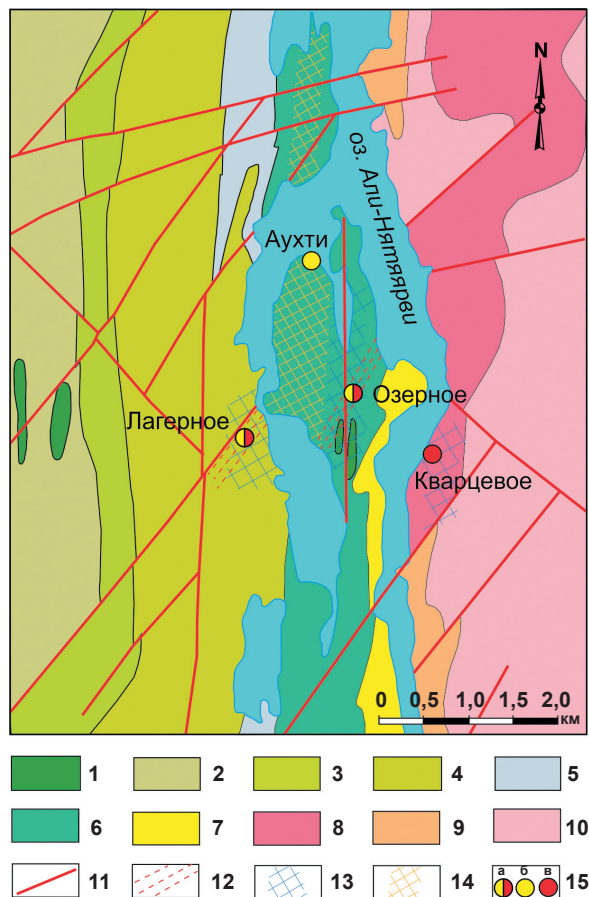


Рис. 2. Схема геологического строения участка Лагерное-Озерное (Нилуттиярвинская поисковая площадь) по [4; 16]. Протерозой: 1–4 – лудиковий: 1 – габбродолериты, 2 – апарвинская свита, кварц-биотитовые, кварц-биотит-амфиболовые сланцы, 3 – полимиктовые конгломераты ноукоярвинской свиты, 4 – амфиболовые, кварц-биотит-амфиболовые, углеродистые сланцы кясиярвинской свиты; 5–7 – ятулий: 5 – юрхямярвинская свита (доломиты с прослоями хлорит-биотитовых, кварц-полевошпатовых и углеродистых сланцев, кварцитопесчаники, серицитовые сланцы), 6 – метагаббродолериты, амфиболиты, кварц-биотит-амфиболовые сланцы нилуттиярвинской свиты, 7 – кварциты, кварцитопесчаники, метаалевролиты ниваярвинской свиты. Архей: 8, 9 – комплекс реоморфических гранитов: 8 – микроклиновые и плагиомикроклиновые граниты, 9 – гнейсы биотитовые, биотит-амфиболовые с линзами лептитов; 10 – кестеньгский мигматит-плагиогранитный комплекс; 11 – тектонические нарушения; 12 – зоны смятия, брекчирования и сдвиговых деформаций; 13 – зоны альбит-кальцит-биотитовых метасоматического изменений; 14 – зоны кварц-хлорит-полевошпатовых изменений и прожилкового окварцевания; 15 – рудопроявления: а – Au-U, б – Au, в – U

Fig. 2. Geological structure diagram of the Lagerny-Ozerny prospect (Niiluttijärvi prospect); according to [4; 16]. Proterozoic. 1–4 – Ludicovian: 1 – gabbro-dolerites, 2 – Apajärvi suite, quartz-biotite and quartz-biotite-amphibole schists, 3 – polymict conglomerates of the Noukojärvi suite, 4 – amphibole, quartz-biotite-amphibole, carbonaceous schists of the Käsijärvi suite; 5–7 – Jatulian: 5 – Jurhämjärvi suite (dolomites with interbeds of chlorite-biotite, quartz-feldspathic and carbonaceous schists, quartzitic sandstones, sericitic schists), 6 – metagabbro-dolerites, amphibolites, quartz-biotite-amphibole schists of the Niiluttijärvi suite, 7 – quartzites, quartzitic sandstones, meta-siltstones of the Nivajärvi suite. Archean: 8, 9 – rheomorphic granite complex: 8 – microcline and plagiomicrocline granites, 9 – biotite, biotite-amphibole gneisses with leptite lenses; 10 – Kestenga migmatite-plagiogranite complex; 11 – tectonic dislocations; 12 – shear-zones, brecciation zones and displacement zones; 13 – metasomatic albite-calcite-biotite alteration zones; 14 – quartz-chlorite-feldspar alteration zones and streaky silicification zones; 15 – ore occurrences: a – Au-U, b – Au, v – U

Рудопроявление Лагерное размещается в метасоматически измененных лудиковийских углеродсодержащих кварц-биотит-амфиболовых и кварц-плагиоклаз-биотитовых сланцах с линзами доломитов. Рудопроявление контролируется сдвиговой зоной северо-восточного простирания (см. рис. 2) мощностью ~70 м и прослеженной протяженностью ~200 м. Породы в пределах зоны рассланцованы, местами брекчированы. Локально магнетит- и углеродсодержащие сланцы подверглись щелочно-карбонатному метасоматозу с формированием альбититов, карбонат-альбитовых, тремолит-карбонатных и кварц-карбонатных метасоматитов. Зона метасоматитов субсогласна со сланцеватостью пород субстрата (~30° СВ, ~30–60° СЗ) и имеет с ними постепенные переходы. Альбититы и карбонат-альбитовые метасоматиты в пределах зоны слагают несколько удлиненных, сближенно расположенных субпараллельных линзовидных тел мощностью до 10–15 м и протяженностью до 200 м.

Урановая минерализация на рудопроявлении представлена давидитом и браннеритом (рис. 4а, 4б). Последний обычно замещается давидитом или гипергенным урансодержащим минеральным агрегатом сложного состава. Для давидита и браннерита характерны высокие содержания Sc (до 0,5% и 0,4%). Наиболее богатое урановое оруденение (до 0,4% на 0,5 м) [4; 17] сосредоточено в альбититах

и карбонат-альбитовых метасоматитах с торитовой минерализацией. Кристаллы торита часто окаймлены калиевым полевым шпатом (рис. 4в).

Золотая минерализация Лагерного проявления (золото самородное, сильванит, калаверит) в отличие от таковой Озерного не обнаруживает тесной ассоциации с минералами урана. Она присутствует в тремолит-карбонатных и кварц-карбонатных прожилковидных обособлениях с вкрапленностью пирита, халькопирита, галенита, молибденита (Se до 6%) и миллерита. Размер золотин и других минеральных фаз золота не превышает 10–15 мкм (рис. 4г–4е). Здесь же впервые для Лагерного проявления, да и в целом для всех рудных объектов Куолаярвинской структуры, установлена Pt-Pd минерализация — кейтконнит, палладий самородный, Pt- (2%) и Au-содержащий (6%) самородный теллур (см. рис. 4а–4в). В этой же ассоциации присутствуют Cl-апатит, Pt- и Pd-содержащий мелонит (Pt 18%, Pd 8%) и золото самородное. Наиболее высокие содержания Au (до 39 г/т) и U (до 0,36%) определены [3; 18] в тремолит-карбонатных и кварц-карбонатных метасоматитах.

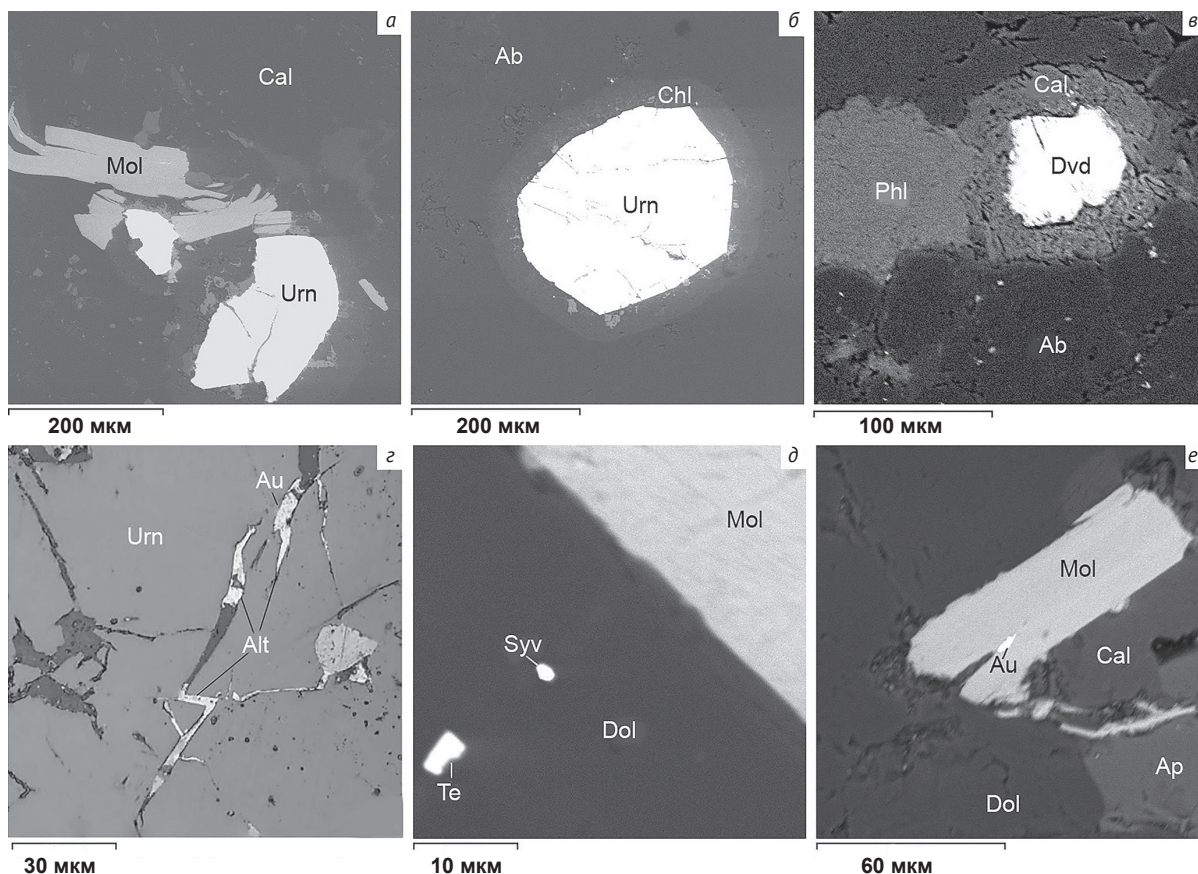


Рис. 3. Урановая и золотая минерализация проявления Озерное. BSE фото. Пояснения в тексте. г – по [4]. Ab – альбит, Alt – алтаит, Ap – апатит, Au – золото самородное, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Dol – доломит, Dvd – давидит, Mol – молибденит, Phl – флогопит, Syv – сylvанит, Te – теллур самородный, Urn – уранинит
Fig. 3. Uranium and gold mineralization of the Ozernoye ore occurrence. BSE photo. For legend, see text. г – according to [4]. Ab – albite, Alt – altaite, Ap – apatite, Au – native gold, Cal – calcite, Chl – chlorite, Dol – dolomite, Dvd – davidite, Mol – molybdenite, Phl – phlogopite, Syv – sylvanite, Te – native tellurium, Urn – uraninite

Для рудных метасоматитов Лагерного проявления характерны повышенные содержания V и Pb (до 0,3% и 0,2% соответственно), объясняющиеся присутствием, давидита, браннерита, V-содержащих биотита (V 0,3%), титаниита (V 1,4–2,2%), рутила (V до 2%), гематита (V до 2,5%), а также Pb-V минералов — кальдеронита, чехита, шерветита.

Тектоно-металлогенические особенности Куусамо-Куолаярвинского металлогенического района

Палеопротерозойский Лапландско-Онежский зеленокаменный пояс с входящим в него Куусамо-Куолаярвинским металлогеническим районом изначально (~2,45 млрд лет) сформировался в интракратонной рифтовой обстановке, связанной с распадом архейского Карельского кратона [19]. Этому предшествовало внедрение расслоенных мафит-ультрамафитовых плутонов (~2,50 млрд лет). Магматическая рифтогенная последовательность начиналась с коматитов и кислых вулканитов. Затем в течение 300–400 млн лет происходило отложение кварцитов, турбидитов, карбонатных пород, черных сланцев, основных вулканитов, периодиче-

ски прорываемых мафическими дайками и силлами (~2,2, ~2,10 и ~2,05 млрд лет). Рифтинг достиг кульминационного развития около 1,97 млрд лет назад обширным проявлением мафического и ультрамафического вулканизма и формированием в некоторых местах океанической коры [9]. Далее последовали неоднократные коллизионные события и компрессионные деформации (4–5 стадий), синхронные проявлениям свекофеннского синорогенного магматизма (1,92–1,87 млрд лет), сопровождавшиеся формированием рудоконтролирующих сдвиговых зон [19]. Метаморфизм при этом в пределах пояса изменялся от зеленосланцевой фации в его центральной части до амфиболитовой в краевой. В этот период в сдвиговых зонах Сиркка и Кийстала были образованы орогенные месторождения золота, включая и Суурикуусикко. Позднее (1,87–1,84 млрд лет) финская и (1,83–1,80 млрд лет) свекобалтийская орогенез [19] обусловили проявление регионального метаморфизма, син- и позднеорогенного гранитного магматизма, формирование сдвиговых дислокаций и Au-U месторождений. С посторогенной магматической ак-

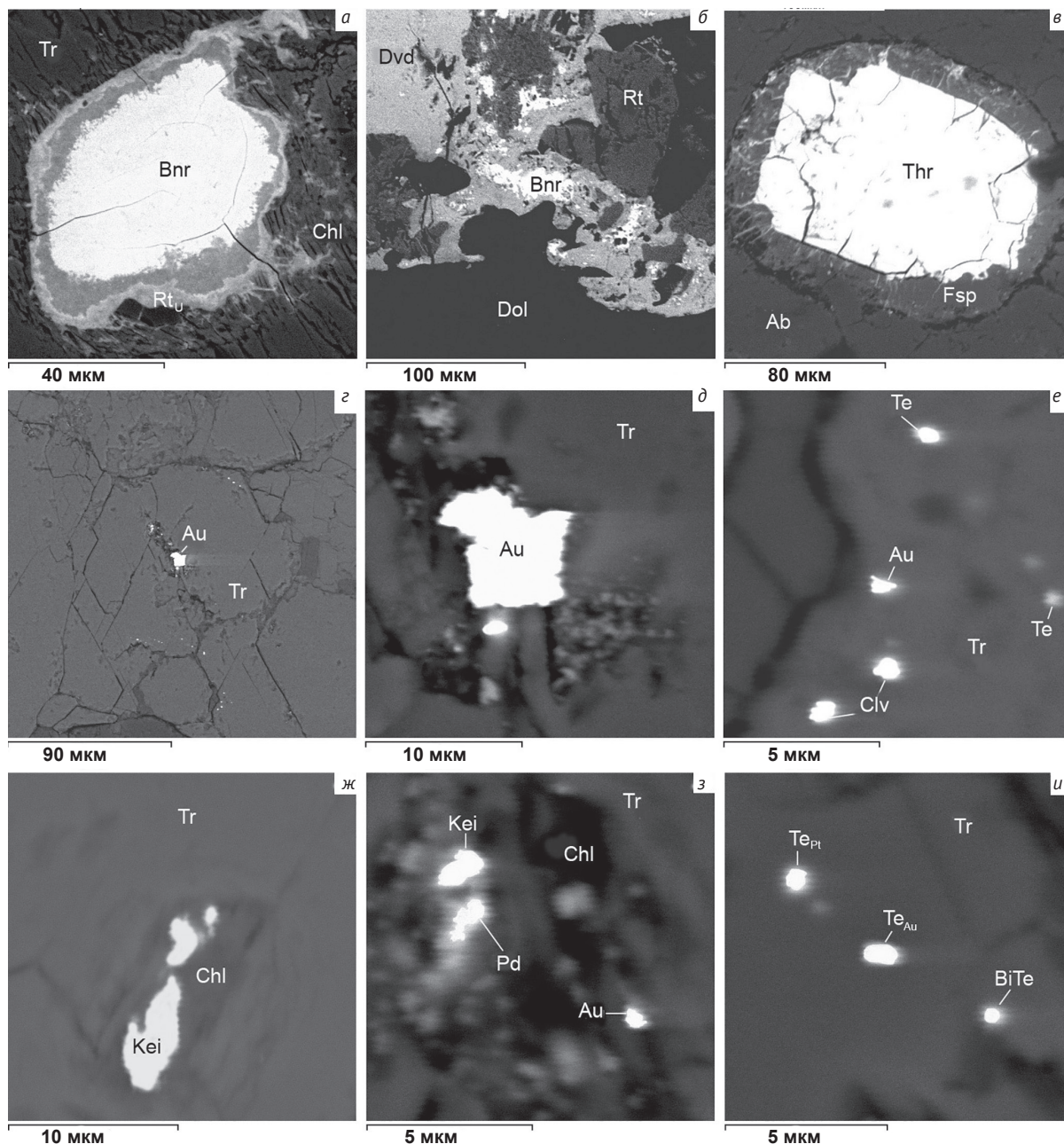


Рис. 4. Урановая, золотая и платинометалльная минерализация проявления Лагерное. BSE фото. Пояснения в тексте. BiTe – минеральная фаза состава Bi_3Te_7 , Bnr – браннерит, Clv – калаверит, Fsp – калиевый полевой шпат, Kei – кейтконнит, Pd – палладий самородный, Rt – рутил, Te_{Pt} – Pt-содержащий (2%) теллур самородный, Te_{Au} – Au-содержащий (6%) теллур самородный, Thr – торит, Tr – тремолит; остальные символы см. рис. 3

Fig. 4. Uranium, gold and platinum-metal mineralization of the Lagernoye ore occurrence. BSE photo. For legend, see text. BiTe – mineral phase composed of Bi_3Te_7 , Bnr – brannerite, Clv – calaverite, Fsp – K-feldspar, Kei – keithconnite, Pd – native palladium, Rt – rutile, Te_{Pt} – Pt-bearing (2%) native tellurium, Te_{Au} – Au-bearing (6%) native tellurium, thorite, Tr – tremolite; for other symbols, see Fig. 3

тивностью (1,8—1,7 млрд лет), вероятно, связано формирование Au-U месторождения Ромпас в поясе Пералпохья (см. рис. 1А) и месторождений IOCG типа в сдвиговой зоне Колари [16].

Большинство золоторудных месторождений рассматриваемого пояса на территории Финляндии относятся к орогенному типу, хотя в отношении месторождений Сааттопора и Пахтаваара это считается

недостаточно обоснованным [9; 14]. В настоящее время единственным разрабатываемым золоторудным орогенным месторождением в Лапландском поясе является Суурикуусикко (табл. 1). Месторождение приурочено к субмеридиональной зоне мощностью ~200 м метасоматически измененных (альбитизация, карбонатизация, сульфидизация) графитистых сланцев и туффицитов с дорудными дай-

ками фельзических альбититов, залегающих между Fe- и Mg-толеитовыми метавулканитами. В этой зоне интенсивно проявлены сдвиговые деформации, брекчирование и гидротермально-метасоматические преобразования пород (альбит, калишпат, карбонат, кварц, графит, пирит, арсенопирит), сопровождающиеся бедной рудной минерализацией с невысокими содержаниями сопутствующих элементов (см. табл. 1). 93% всего золота находится в арсенопирите и пирите и являются так называемым невидимым золотом [9; 14].

Месторождение Юомасуо относится к орогенному мезотермальному типу с атипичной рудной ассоциацией (см. табл. 1) и контролируется региональной сдвиговой зоной СЗ простираения и СВ shear-зонами более низшего порядка. Самородное золото ассоциирует с висмутом и теллуридами, отмечается в виде микровключений в пирите, кобальтине и уранините и в микропрожилках совместно с Bi и Te. На месторождении в 1992 г. была проведена тестовая добыча руды с содержанием Au 4,9 г/т — получено 18 кг золота [9].

Месторождения Сааттопора и Пахтаваара разрабатывались карьерами в конце прошлого века. По разным оценкам суммарно на них добыто 7—14 т золота (табл. 1) и 6200 т меди (Сааттопора). Оставшиеся ресурсы золота в этих месторождениях составляют ~10 т (Au ~4 г/т). Подготовлены проекты

по возобновлению разработки этих месторождений, но уже подземным способом.

В упрощенном виде метасоматические изменения рудовмещающих пород в Куусамо-Куоляярвинском металлогеническом районе происходили в последовательности [9; 13; 14], в общих чертах согласующейся с наблюдаемой на рудопоявлениях Озерное и Лагерное: обширная предметаморфическая альбитизация, сопровождающаяся урановой минерализацией; син- позднеметаморфический(?) Mg-Fe метасоматоз (хлорит, тремолит-актинолит, магнетит, сульфиды Fe), тесно связанный с золотой минерализацией; калиевый ($\pm S$) метасоматоз (биотит, серицит $\pm$ пирит), пластичные деформации и дополнительная или ремобилизованная золотая минерализация; карбонатизация, окварцевание, хрупкие деформации и заключительная Au-Te минерализация.

Уран-благороднометалльные проявления района Виссу-Райконкоски Северного Приладожья

В районе Виссу-Райконкоски (см. рис. 1А), входящем в Раахе-Ладожскую надсубдукционную зону, известно несколько проявлений с комплексной (Au-U, Au-Pd-U) рудной минерализацией, локализованных в метасоматически преобразованных породах лудиковия, во многом тождественных их стратиграфо-формационным аналогам Куоляярвинской структуры и Au- и U-содержащим рудным объектам

Таблица 1. Геолого-экономическая характеристика золоторудных месторождений и проявлений Куоляярвинской структуры (карельская Арктика) и сопредельных зарубежных территорий

Table 1. Geological and economic characteristics of gold deposits and ore occurrences of the Kuolajärvi structure (Karelian Arctic) and adjacent foreign territories

Месторождение, возраст, млрд лет	Вмещающие породы	Минеральные ассоциации	Геохимические ассоциации	Запасы, ресурсы, содержание Au	Добыча золота
<i>Норвегия</i>					
Биджовагге, 1,84—1,89	Альбитовые фельзиты, графитистые сланцы	Py, Pyh, Ccp, Clv, Dvd	Te, Cu, U	11,5 т, 4 г/т	7,8 т
<i>Финляндия</i>					
Суурикуусикко, 1,91—1,79	Альбитизированные толеиты, графитистые аргиллиты	Apy, Py, Gdf, Pyh, Bnn, Ttr, Mdo, Rt, Gn, Bi	As, Ag, Bi, Co, Sb, Se, W	238—274 т, 4,3 г/т	~75—90 т
Сааттопора, 1,87—1,78	Кварц-кальцитовые жилы в альбитизированных филлитах	Py, Pyh, Ccp, Urn, Bin	Cu, Ag, As, B, Bi, Se, Te, U, W	6,3 т, 2,9 г/т	2,2—6,3 т
Пахтаваара 2,1—2,05?	Кварц-баритовые линзы в биотитизированных амфиболитах	Brт, Mag, Py, Ccp, Cth, Sch	Ba, Ag, B, Te, W	11,4—15,2 т, 2,29 г/т	5,0—7,7 т
Юомасуо, 1,9—1,8?	Альбитизированные вулканиты, серицитизированные кварциты	Py, Cbl, Urn, Mol, Alt, Clv, Mlt, Tbi, Cth, Kaw, Sch	Co, U, Cu, Ni, As, Mo, Se, Te, Bi, W, Pb, V, LREE	9,6 т, 4,9 г/т	0,018 т

Месторождение, возраст, млрд лет	Вмещающие породы	Минеральные ассоциации	Геохимические ассоциации	Запасы, ресурсы, содержание Au	Добыча золота
Ромпас: уранинит 1,95—1,9 золото 1,85—1,65	Основные вулканы, кварциты, тремолит-кварц-доломит-анкеритовые жилы с пиробитумом	Pyh, Sch, Urn, Ttd, Ccp, Gn, Alt, Mol, Mdo, Alt, Mlt, Frb, Mnb, Bi	U, Pb, Te, Mo, Bi, Co	60 т, Au до 3,3%	
Россия					
Майское, 1,9—1,7	Кварцевые жилы в основных вулканитах	Ccp, Pyh, Py, Cbl, Cth, Ttd, Bin, Tsm, Hes	Cu, Pb, Ag, As, Sb, Bi, Mo, W	1,1 т (P ₁), 7,6 г/т	51 кг
Озерное, 1,75—1,63	Амфиболиты, амфибол-биотитовые сланцы, альбититы, кварц-анкерит-альбитовые жилы	Py, Ccp, Gn, Mol, Cth, Urn, Bnr, Dvd, Hem	U, Cu, Pb, Mo, Ag, Bi, Te, V	10—18 т (P ₃), Au до 20,5 г/т	
Лагерное, 1,9—1,63?	Кварц-биотит-амфиболовые и углеродистые сланцы, доломиты, альбититы, тремолит-анкеритовые метасоматиты	Py, Ccp, Urn, Bnr, Dvd, Thr, Mlr, Kei, Pd, Te, Mlt, Clv, Syv	U, Th, Pd, Te, Cu, Ni, V, Pb	5—7 т (P ₃), Au до 39 г/т	

Примечание. Таблица составлена с использованием данных [9; 13; 14]. Alt — алтаит, Apy — арсенопирит, Bi — висмут, Bin — висмутин, Bnn — бурнонит, Bnr — браннерит, Brt — барит, Cbl — кобальтин, Ccp — халькопирит, Clv — калаверит, Cth — клаусталит, Dvd — давидит, Frb — фробергит, Gn — галенит, Gdf — герсдорфит, Hem — гематит, Hes — гессит, Kaw — кавацулит, Kei — кейтконит, Mag — магнетит, Mdo — мальдонит, Mlr — миллерит, Mlt — мелонит, Mnb — монтбрейит, Mol — молибденит, Pd — палладий, Py — пирит, Pyh — пирротин, Rt — рутил, Sch — шеелит, Syv — сивьянит, Tbi — теллуриовисмутит, Te — теллур, Thr — торит, Tsm — цумоит, Ttr — тетраэдрит, Urn — уранинит.

Note. The table was compiled using data from [9; 13; 14]. Alt — altaite, Apy — arsenopyrite, Bi — bismuth, Bin — bismuthinite, Bnn — bournonite, Bnr — brannerite, Brt — barite, Cbl — cobaltite, Ccp — chalcopyrite, Clv — calaverite, Cth — clausthalite, Dvd — davidite, Frb — frobergite, Gn — galena, Gdf — gersdorffite, Hem — hematite, Hes — hessite, Kaw — kawatzulite, Kei — keithconite, Mag — magnetite, Mdo — maldonite, Mlr — millerite, Mlt — melonite, Mnb — montbreyite, Mol — molybdenite, Pd — palladium, Py — pyrite, Pyh — pyrrhotite, Rt — rutile, Sch — scheelite, Syv — sylvanite, Tbi — tellurobismuthite, Te — tellurium, Thr — thorite, Tsm — tsumoite, Ttr — tetrahedrite, Urn — uraninite.

в северо-западной части Раахе-Ладонской зоны на территории Финляндии [9; 20].

Рудопроявления участка Виссу. Несколько Au-U и полиметаллических проявлений локализованы в северо-восточном обрамлении Кирьяволахтинского архейского гнейсогранитного купола в зоне интенсивного проявления плектиновых и сдвиговых дислокаций, ограниченной с северо-востока надвигом (рис. 5).

Рудовмещающий комплекс пород, прослеживающийся в северо-западном направлении на ~20 км, представлен мраморизованными известняками, доломитами и углеродистыми сланцами с сульфидной минерализацией. Породы испытали метасоматические преобразования, проявившиеся в развитии тремолита, флогопита (Cr 1,3%, V 0,4%), фенгита, калиевого полевого шпата, альбита, кварца, эпидота,

хлорита, сопровождавшиеся перекристаллизацией первичной рудной минерализации (магнетит, ильменит, пирротин, халькопирит, галенит, молибденит, уранинит, браннерит) и новообразованием арсенопирита, кобальтина, пирита, сфалерита, клаусталита и самородного золота. Уранинит и браннерит ассоциируют с апатитом, содержание которого местами достигает 2—3%. Золото высокопробное микроразмерное (3—5 мкм). Его содержание в штучных пробах варьирует в пределах 0,1—2 г/т, Ag — 3—30 г/т, U — до 0,05%. По данным [22], в рудах определены также Pd и Pt (0,4—0,8 г/т в сумме). В 15 км от северо-западных проявлений Виссу находится урановое месторождение Мраморная Гора, где в толще переслаивания карбонатных пород с амфиболовыми и графит-амфиболовыми сланцами выявлено 7 рудных зон с уранинитом, урансодержащим апа-

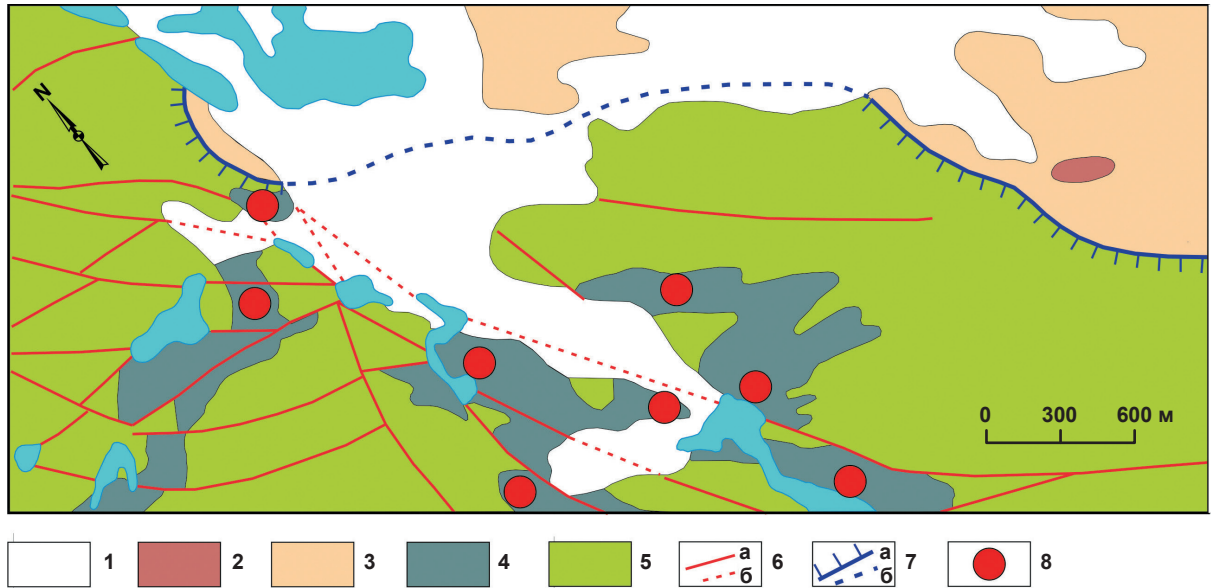


Рис. 5. Схема геологического строения участка Виссу (по [21] с изменениями): 1 — четвертичные отложения; 2 — кварцевые диориты; 3 — метапесчаники, кристаллические сланцы ладожской серии; 4, 5 — сортавальская серия: 4 — мраморизованные известняки, доломиты, углеродистые сланцы с вкрапленной сульфидной минерализацией, 5 — толща переслаивания пара- и ортоамфиболитов, амфиболовых сланцев; 6 — тектонические нарушения: а — в коренных выходах пород, б — перекрытые четвертичными отложениями; 7 — надвиги: а — в коренных выходах пород, б — перекрытые четвертичными отложениями; 8 — рудопоявления (U, As, Au, Cu, Zn, P)

Fig. 5. Geological structure diagram of the Vissu prospect (according to [21], modified): 1 — Quaternary strata; 2 — quartz diorites; 3 — metasandstones, crystalline schists of the Ladoga series; 4, 5 — Sortavala series: 4 — marbled limestones, dolomites, carbonaceous schists with disseminated sulphide mineralization, 5 — para- and orthoamphibolite and amphibole schist interbedding unit; 6 — tectonic dislocations: a — in bedrock exposures, b — overlain by Quaternary strata; 7 — overthrusts: a — in bedrock exposures, b — overlain by Quaternary strata; 8 — ore occurrences (U, As, Au, Cu, Zn, P)

титом, сульфидами, оконтуренных по бортовому содержанию U 0,05% [23]. Их опробование на золото и платиноиды по настоящее время не проводилось. В северо-западной части Раахе-Ладожской зоны в сходной обстановке на территории Финляндии расположено Zn-Pb-Cu-Au месторождение Виханти с горизонтами ураноносных (U 0,03%, запасы U 700 т) апатитовых руд [9; 14].

Рудопоявление Малое Янис-ярви. Рудная минерализация сосредоточена в углеродсодержащих сланцах людиковия, испытавших щелочно-карбонатный метасоматоз (альбит, калиевый полевой шпат, Fe-анкерит, кальцит, серицит, кварц). Оруденение представлено несколькими минеральными ассоциациями: первичной (ильменит, пирит, садбереит, пирротин, халькопирит, молибденит, браннерит, давидит), наложенной — Ag-содержащий галенит (Ag до 7%), клаусталит, квачекит, акантит, и гипергенной (рутил, крокоит, марказит, церрусит, сера самородная). Садбереит встречается в виде микровключений (1—5 мкм) единичных зерен и их скоплений в пирите, а акантит — в пирротине. Содержание Au (до 1,3 г/т), Ag (до 14 г/т), Pt, Pd (до 1 г/т).

Рудопоявления Леппясюрья и Полвилампи (рис. 6). Эти проявления по геологической позиции, вмещающим породам, их метасоматическим преобразованиям и рудным минеральным ассоциациям аналогичны проявлению М. Янис-ярви, отличаясь

только более высокими содержаниями графита (среднее содержание 22,2%, 28,5%) и большим разнообразием рудной минерализации — добавляются раклиджит, гессит, богдановичит, алтаит, аргентопентландит и Ag-содержащий халькозин. Графитовые руды имеют повышенные содержания V 0,2%, Mo 0,03%, Ag до 70 г/т, Au до 0,3 г/т, ΣPd,Pt до 1,5 г/т, Sc до 200 г/т [22]. Биотит содержит ~1% V. Запасы графита по C₂ составляют 239 млн т [24].

Рудопоявление Райконкоски (черносланцевое) (см. рис. 6). Рудопоявление приурочено к сульфидсодержащим черным сланцам, подстилающим долериты с кварцево-жильным золото-теллуридным проявлением Райконкоски [25]. Углеродистые сланцы интенсивно брекчированы, пронизаны кварцевыми прожилками, альбитизированы и хлоритизированы. Биотит содержит V ~1% и Cr до 0,3%. Сланцы имеют повышенные содержания Mo — 0,022—0,046%, Cu — 0,05%, Pb — 0,032%, Zn — 0,05%, V — 0,1—0,3%, Ag — 1—3 г/т, Au (до 0,3 г/т) и элементов платиновой группы (до 1,5 г/т). Они содержат вкрапленную рудную минерализацию — пирит, рутил (V 1,5%, Nb 1,8%, W 0,5%) ильменит, молибденит, халькопирит, ковеллин, галенит (Bi до 1,3%), клаусталит, кобальтин, сфалерит, пирротин, самородные — медь, цинкистую медь (Zn ~35%), никель, серебро. Минералами концентраторами Pt и Pd являются герсдорфит (Pt 1%, Pd 0,5%) и кобальтин (Pt 1%).

Обсуждение результатов

Рассмотренные рудопроявления и месторождения Куоляярвинской (включая ее зарубежную часть) и Ладожской структур имеют ряд общих особенностей, часть которых свойственна также и комплексным (V, U, Pt, Pd, Au, Mo) месторождениям Падминской группы в Онежской структуре. Они образованы по палеопротерозойским породам нижних горизонтов людиковия, представленных известняками, доломитами, углеродистыми и амфиболовыми сланцами, амфиболитами с сингенетичной сульфидной ($\pm$ платинометалльной) и U-P минерализацией, установленной как на территории Карелии, так и в Финляндии [9; 20]. Углеродистые сланцы обогащены V, Cu, Zn, Pb, Mo, Co, в Куоляярвинской структуре наиболее контрастно — Se (среднее содержание 39,8 г/т). Соответственно кларк его концентрации относительно континентальной коры по [26] K_k равен 442,2, что создавало, таким образом, крупномасштабные геохимические ресурсы этого критического металла, предопределяющие возможность более значительного концентрирования его и сопутствующих рудных элементов (Te, Au, Pt, Pd) при гидротермально-метасоматических преобразованиях углеродистых сланцев. Черные сланцы Онежской структуры имеют более низкие средние содержания Se (~ 10 г/т, $K_k = 111,1$), хотя в них широко распространены Se-содержащие минералы и собственные его минеральные фазы [27].

Сопоставляемые рудопроявления Куоляярвинской и Ладожской структур контролируются системами глубинных разломов в палеопротерозойских породных комплексах вблизи их контакта с архейским гнейсогранитным фундаментом и более локальными сдвиговыми зонами. Они имеют однотипный набор геохимически индикаторных сопутствующих рудных элементов — V, Mo, Se, Te, Co, Pb. Флогопит, био-

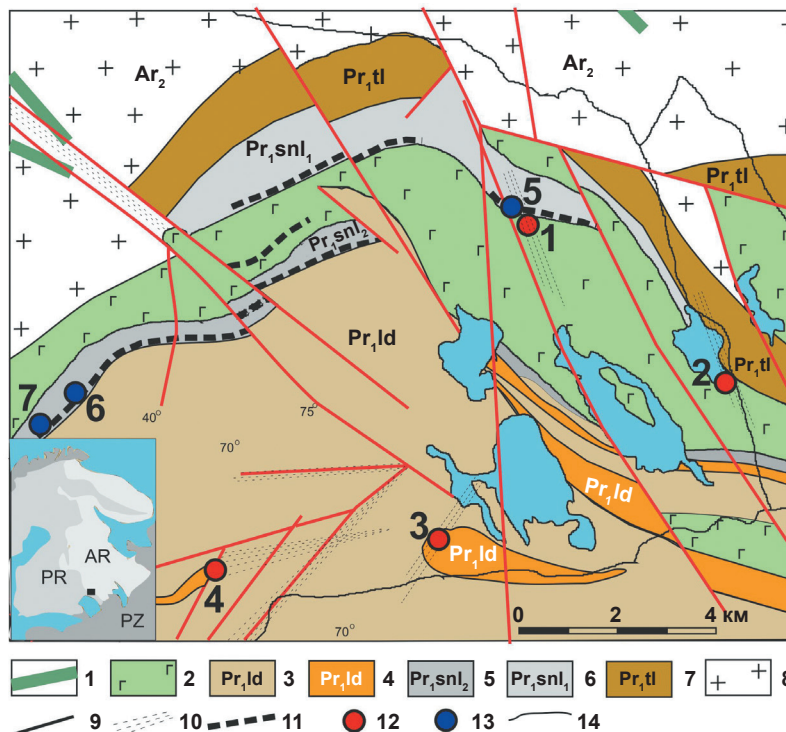


Рис. 6. Схема геологического строения района проявлений Леппясярва – Райконкоски; по [6] с дополнениями: 1 – габбродиабазы (дайки); 2 – габбро-дOLERИТЫ (силл); 3, 4 – ладожская серия: 3 – ритмично переслаивающиеся плагиоклаз-биотит-кварцевые сланцы и их высокоглиноземистые разновидности, 4 – карбонатные породы; 5, 6 – соанлахтинская свита: 5 – верхняя подсвита (углеродсодержащие биотит-серицит-хлоритовые, тальк-хлоритовые, амфиболовые сланцы с прослоями пиритовых руд, чередующиеся с метадолеритами), 6 – нижняя подсвита (переслаивание пестроцветных доломитов, мраморов с кварц-биотитовыми, серицит-тальк-хлоритовыми сланцами, иногда углеродсодержащими с подчиненными телами метадолеритов); 7 – туломозерская свита: красноцветные доломиты с прослоями кварц-серицит-хлоритовых, карбонат-хлоритовых сланцев, песчаников и гравелистов в основании разреза; 8 – архейский ремобилизованный фундамент (гранитоиды, гнейсы, гранитоиды); 9 – тектонические нарушения; 10 – сдвиговые дислокации, зоны расщепления, смятия, милонитизации; 11 – горизонты рудоносных (Mo, V, полиметаллы, золото, элементы платиновой группы) графитистых сланцев; 12, 13 – рудопроявления: 12 – (Au, Ag, Te, Se, Bi, Cu, Pb), 13 – (Mo, V, полиметаллы, Au, Pd, графит). На рисунке: 1 – Райконкоски; 2 – Хиедаярви, 3 – Серьярви; 4 – Вуохенлампи; 5 – Райконкоски-2; 6 – Полвилампи; 7 – Леппясярва

Fig. 6. Geological structure diagram of the Leppäsjärvi - Raikonkoski occurrences; according to [6], modified. 1 – gabbro-diabase (dikes); 2 – gabbro-dolerites (sill); 3, 4 – Ladoga series: 3 – rhythmically interbedding plagioclase-biotite-quartz schists and their and their high-alumina varieties; 4 – carbonate rocks; 5, 6 – Soanlahti suite: 5 – upper subsuite (carbonaceous biotite-sericite-chlorite, talc-chlorite, amphibole schists with pyrite ore interbeds alternating with metadolerites); 6 – lower subsuite (interbedding of multi-coloured dolomites and marbles with quartz-biotite, sericite-talc-chlorite schists, occasionally with carbonaceous schists with minor metadolerite bodies); 7 – Tulomozero suite: red dolomites with quartz-sericite-chlorite and carbonate-chlorite schist, sandstone and gravelstone interbeds at the base of the unit; 8 – remobilized Archean basement (granite gneisses, gneisses, granitoids); 9 – tectonic dislocations; 10 – displacement, schistosity, shearing and mylonitization zones; 11 – ore-bearing (Mo, V, base metals, gold, platinum-group elements) graphite schist horizons; 12, 13 – ore occurrences: 12 – (Au, Ag, Te, Se, Bi, Cu, Pb), 13 – (Mo, V, base metals, Au, Pd, graphite). In the picture: 1 – Raikonkoski; 2 – Hietajärvi, 3 – Serjärvi; 4 – Vuohenlampi; 5 – Raikonkoski-2; 6 – Polvilampi; 7 – Leppäsjärvi

тит, титаномагнетит, рутил и гематит имеют высокие содержания V (до 3%),

Главными минералами-концентраторами Se являются Se-галенит, клаусталит и Se-молибденит (Se до 18%, проявления Куоляярвинской

структуры). Другие минеральные фазы селена выделялись на заключительных стадиях рудообразования и обычно в ассоциации с висмутидами, теллуридами и самородным золотом. Селеновая геохимическая специализация характерна для большинства рудных объектов Куоляярвинской структуры. Это в совокупности с широким проявлением дорудной альбитизации и многократным превышением содержания хлора над фтором в слюдах и апатите, вероятно, свидетельствует об участии в рудообразующем процессе эвапоритов как источника Na, Cl, Se и др. при их метаморфизме и гидротермально-метасоматическом воздействии свекофенских посторогенных гранитов, дайки которых с возрастом 1748 ± 13 млн лет [16] известны в Куоляярвинской структуре. Участие эвапоритовых флюидов в формировании комплексов Au-U месторождений (Юомасуо, Хангаслампи и др.) предполагается также и в сопредельных с Куоляярвинской структурах на территории Финляндии [13—15]. Именно они, по-видимому, ответственны за обширные площадные метасоматические преобразования различных пород при метаморфизме с формированием альбититов и мобилизацией ряда рудных элементов, включая U и Au, минералы которых выделялись соответственно до кульминации метаморфизма (U) и позже (Au) на стадиях проявления магнезиально-железистого, калиевого и кварц-карбонатного метасоматоза. Последующее Au-Te-Se минералообразование происходило с развитием анкерита, Fe-анкерита и кварца по доломиту и кальциту. На Лагерном проявлении в альбититах развивались также прожилковидные метасоматиты тремолит-карбонатного и кварц-карбонатного состава с сульфидной и благороднометалльной (Au, Pd) минерализацией.

Главными минералами урана для всех Au-U проявлений Куоляярвинской и Ладужской структур являются уранинит и браннерит, второстепенными – давидит и коффинит. Браннерит и давидит — V-содержащие (соответственно, 2—4% и 12—20%) минералы, что подчеркивает ванадиевую геохимическую специфику рудообразующего процесса на стадии формирования уранового оруденения.

Платинометалльная минерализация в рудах представлена кейтконнитом, садбереитом, Pt- и Pd-содержащими самородным теллуrom, мелонитом, герсдорфитом и кобальтином. Она встречается в карбонат-тремолитовых с графитом (Лагерное) и флогопит-хлоритовых метасоматитах (М. Янисярви), а также в хлоритизированных высокоуглеродистых сланцах (Райконкоски). При этом во всех случаях исходные породы являются углерод- и сульфидсодержащими. В проявлениях Куоляярвинской структуры рудным минералом с изоморфной примесью Pt и Pd является мелонит, а в Ладужской структуре — герсдорфит и кобальтин, что свидетельствует о различиях рудообразующих процессов в этих структурах по активности серы и теллура.

Заключение

Структурный контроль, общая последовательность минералообразования и видовой состав рудных минеральных ассоциаций на Au-U рудопоявлениях Куоляярвинской (Арктическая зона) и Ладужской структур в общих чертах сходны. Отмечается также некоторая их тождественность в этом аспекте с Падминским типом оруденения [28]. Вероятно, эта их общность обусловлена исходной связью с одним и тем же литогеохимическим комплексом — людикийским континентально-рифтогенным черносланцево-карбонатно-базальтовым ($\pm$ эвапориты), а гидротермально-метасоматические и рудообразующие процессы были инициированы: в Куоляярвинской структуре интраконтинентальной коллизией при формировании Лапландско-Кольско-Беломорского орогена в палеопротерозое и реактивированы в палеозое; в Ладужской и Онежской структурах — свекофенским орогенезом и реактивированы в рифее и, возможно, в более молодые эпохи, судя по наличию соответствующих возрастных популяций циркона [29].

Углеродистые сланцы людикийского комплекса обогащены V, Se, Mo, Cu, Zn, Pb, Co, Pt, Pd, Au, что определяло и соответствующую геохимическую и металлогеническую специализацию образованных с их участием рудоносных метасоматитов. Впервые для Куоляярвинской структуры в этих метасоматитах на проявлении Лагерном (Нилуттиярвинская поисковая площадь) установлена платиноидная минерализация — кейтконнит, палладий самородный, Pt- и Au-содержащий теллур, Pt- и Pd-содержащий мелонит. Лагерное и Озерное проявления в общих чертах тождественны финским промышленным Au-U месторождениям. Это с учетом некоторого их сходства с месторождениями Падминской группы Онежской структуры и высоких содержаний Pd (до 80 г/т) [10] в сульфидизированных черных сланцах на периферии Лагерного проявления показывает высокую перспективность Нилуттиярвинской поисковой площади на комплексное (совмещенное) уран-благороднометалльное оруденение и предопределяет возможность наращивания минерально-сырьевой базы карельской Арктики на благородные металлы и уран.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания Института геологии Карельского научного центра РАН (номер госрегистрации 225011700925-0).

Благодарность

Автор благодарен А. Н. Терновому и Г. Н. Соколову за помощь в аналитических исследованиях и переводе текста на английский язык.

Литература/References

1. Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В., Галямов Ф. Л. Арктические ресурсы золота в глобальной перспективе // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 28—37.
2. Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В. и др. Арктические ресурсы цветных и благородных металлов в глобальной перспективе // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 1 (17). — С. 38—46.
3. Афанасьева Е. Н., Миронов Ю. Б. Потенциал золото-уранового оруденения Балтийского щита и перспективы его реализации // Труды 5-го Международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство». — М.: ФГБУ «ВИМС», 2021. — С. 42—52.
4. Афанасьева Е. Н., Миронов Ю. Б., Петрова А. А., Козлов А. В. Золото-урановое оруденение Балтийского щита // Регион. геология и металлогения. — 2024. — № 4. — С. 147—164. — DOI: 10.52349/0869-7892_2024_100_147-164.
5. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. — Кн. 1 / Под. ред. В. П. Михайлова и В. Н. Аминова. — Петрозаводск: Карелия, 2005. — 278 с.
6. Иващенко В. И., Голубев А. И. Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. — 369 с.
7. Иващенко В. И., Щипцов В. В. Минерально-сырьевая база карельской Арктики — перспективы развития и освоения // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 123—134. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-123-134.
8. Pankka H. S., Vanhanen E. J. Aulakogen related epigenetic Au-Co-U deposits in northeastern Finland. Geol. Surv. Finland. Current Research. 1988. Espoo, 1989, pp. 91—94.
9. Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia. Ed. P. Eilu. Geological Survey of Finland. Special Paper 53. [S. I.], 2012, 401 p.
10. Ахмедов А. М., Голубев А. И., Шурыгин В. Н. Геохимические аномалии благородных металлов в черных сланцах Салла-Куоляярвинского прогиба (Северная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии. — Вып. 3. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. — С. 26—32.
11. Hancock M. C., Maas R., Wilde A. R. Jabiluka uranium-gold deposits. Geology of the Mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. Ed. by F. E. Huhes. Melbourne, Austral. Inst. Min. Metal., 1990, pp. 785—793.
12. Мизута А. К. Состав и парагенетические минеральные ассоциации урановых руд Эльконского района (Алданский щит, Россия) // Геология руд. месторождений. — 1997. — № 4. — С. 323—343.
13. Miguta A. K. Composition and paragenetic mineral associations of uranium ores in the Elkon district, Aldan Shield, Russia. Geology of Ore Deposits, 1997, no. 4, pp. 323—343. (In Russian).
14. Vanhanen E. Cobalt, gold and uranium-bearing mineralization and their relation to deep fractures in the Kuusamo. Geological Survey of Finland. Espoo, Finland, 1998, 300 p.
15. Mineral Deposits of Finland. Ed. by W. D. Maier, R. Lahtinen, H. O'Brien. [S. I.], Elsevier, 2015, 792 c.
16. Vasilopoulos M., Molnár F., O'Brien H., Lahaye Y., Lefèvre M., Richard A., André-Mayer A.-S., Ranta J.-P., Talikka M. Geochemical signatures of mineralizing events in the Juomasuo Au-Co deposit, Kuusamo belt, northeastern Finland. Mineralium Deposita, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01039-8>.
17. Калинин А. А. Золото в метаморфических комплексах северо-восточной части Фенноскандинавского щита. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2018. — 250 с. — DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-378-8.
18. Kalinin A. A. Gold in the metamorphic complexes of the northeastern Fennoscandian Shield. Apatity, FIC KNC RAS, 2018, 250 p. (In Russian).
19. Коваль А. В., Богачев В. А., Петров С. В. Особенности рудной минерализации золотоурановых рудопроявлений Озерное и Лагерное Куоляярвинской структуры (Северная Карелия) // Вестн. МГТУ. — 2019. — Т. 22, № 1. — С. 23—35. — DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-23-35.
20. opment and exploration. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 3 (35), pp. 123—134. (In Russian).

- Koval A. V., Bogachev V. A., Petrov S. V. Ore mineralization pattern in the Ozeroye and Lageroye gold-uranium ore occurrences of the Kuolajärvi structure, North Karelia. *Bull. MGTU*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 23—35. (In Russian).
18. Лебедев И. О. Новые данные по золотоносности и ураноносности Куусамо-Панаярвинского рудного района (Балтийский щит) // Изв. Сиб. отделения РАЕН. Секция наук о Земле. — 2015. — № 2 (51). — С. 26—34.
- Lebedev I. O. New data on the gold and uranium potential of the Kuusamo-Paanajärvi Ore Province, Baltic Shield. *News of the Siberian Branch of the Section of Geosciences of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2015, no. 2 (51), pp. 26—34. (In Russian).
19. Precambrian Geology of Finland — Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Lehtinen M., Nurmi P. A., Ramo O. T. (eds.). Amsterdam, Elsevier, 2005, 736 p.
20. Ekdahl E. Early Proterozoic Karelian and Svecofennian formations and the Evolution of the Raahe-Ladoga Ore Zone, based on the Pielavesi area, central Finland. *Geological Survey of Finland, Bull.* 373, 1993, 137 p.
21. Попов В. Е. Генезис вулканогенно-осадочных месторождений и их прогнозная оценка. — Л.: Наука, 1991. — 287 с.
- Popov V. E. Genesis of volcanic-sedimentary deposits and their forecast evaluation. Leningrad, Nauka, 1991, 287 p. (In Russian).
22. Попов В. Е., Торицын А. Н. Благородные металлы (Au, Ag, МПГ) в стратиформных редкометалльно-полиметаллических рудах Северного Приладожья // Тезисы докладов регионального симпозиума «Благородные металлы и алмазы севера Европейской части России». — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. — С. 135—137.
- Popov V. E., Toritsyn A. N. Noble metals (Au, Ag, PGE) in the stratiform rare-metal-base metal ores of the northern Ladoga Lake region. *Abst. for the Reg. Symp. "Noble metals and diamonds of the North European Russia"*. Petrozavodsk, KarRC, RAS, 1995, pp. 135—137. (In Russian).
23. Кушнеренко В. К., Шустов Б. Н., Громов Ю. А., Петров Ю. В. Шестьдесят лет поисков уранового сырья на Северо-Западе России // Разведка и охрана недр. — 2005. — № 10. — С. 18—29.
- Kushnerenko V. K., Shustov B. N., Gromov Yu. A., Petrov Yu. V. Sixty-year uranium prospecting in Northwest Russia. *Exploration and protection of subsoil*, 2005, no. 10, pp. 18—29. (In Russian).
24. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. — Кн. 2 / Под. ред. В. П. Михайлова и В. Н. Аминова. — Петрозаводск: Карелия, 2006. — 356 с.
- Mineral potential of the Republic of Karelia. Vol. 2. Ed. by V. P. Mikhailov and V. N. Aminov. Petrozavodsk, Karelia, 2006, 356 p. (In Russian).
25. Ivashchenko V. I., Sundblad K., Toritsin A. N., Golubev A. I., Lavrov O. B. Rajkonkoski gold-telluride ore occurrence: a new high prospective type of complex noble metal mineralization in the Karelian proterozoic. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 423, no. 8, pp. 1187—1193.
26. Rudnick R. L., Gao S. The Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, Holland H. D. and Turekian K. K. (eds.), 2002, vol. 3, pp. 1—64.
27. Полеховский Ю. С., Кацнельсон А. Б. Селенидная минерализация Заонежского полуострова (Республика Карелия) // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXVI молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. — С. 71—74.
- Polekhovsky Yu. S., Kapnelson A. B. Selenide mineralization of the Trans-Onega Peninsula, Republic of Karelia. Actual problems in Precambrian geology, geophysics and geocology. Proceedings of the 26th Scientific Youth School-Conference, in memory of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences K. O. Kratz and Academician F. P. Mitrofanov. Petrozavodsk, 2015, pp. 71—74. (In Russian).
28. Леденева Н. В., Пакульнис Г. В. Минералогия и условия образования уран-ванадиевых месторождений Онежской впадины (Россия) // Геол. рудн. мест. — 1997. — № 3. — С. 258—268.
- Ledeneva N. V., Pakulnis G. V. Mineralogy and conditions of formation of uranium-vanadium deposits in the Onega Depression, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 1997, no. 3, pp. 258—268. (In Russian).
29. Гольцин Н. А., Лохов К. И., Капитонов И. Н. и др. Полистадийные преобразования высокоуглеродистых пород лудиковия Онежского прогиба // Регион. геол. и металлогения. — 2010. — № 41. — С. 61—74.
- Goltsyn N. A., Lokhov K. I., Kapitonov I. N., Polekhovsky Yu. S., Lobikov A. F., Sergeev S. A. Multi-stage alteration of Ludicovian high-carbon rocks of the Onega Trough. *Regional Geology and Metallogeny*, 2010, no. 41, pp. 61—74. (In Russian).

Информация об авторе

Ивашченко Василий Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии, Карельский научный центр РАН (185910, Россия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: ivashche@krc.karelia.ru.

URANIUM-NOBLE METAL MINERALIZATION OF THE KARELIAN ARCTIC AND NORTHERN PRILADOZHYE: MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL COMPARISON AND PROSPECTS

Ivashchenko, V. I.

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
(Petrozavodsk, Russian Federation)

The article was received on April 16, 2025

For citing

Ivashchenko V. I. Uranium-noble metal mineralization of the Karelian Arctic and Northern Priladozhye: mineralogical and geochemical comparison and prospects. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 55—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-55-68. (In Russian).

Abstract

The article considers the results of a detailed mineralogical and geochemical study and comparative analysis of the Lagernoye and Ozeroye gold-uranium occurrences in the Arctic zone of the Republic of Karelia (Kuolajärvi structure) and similar mineralization in the Ladoga and Onega structures. The author specifies the genetic and geochemical features and proposes a model of their formation involving evaporites, fault metasomatism and granitoid magmatism. Based on the detection and identification of platinum-metal mineral phases in metasomatically altered black shales of the Lagernoye occurrence, the reliability of analytical data on high Pd contents in them is confirmed and, in this aspect, the metallogenic potential of the Niluttijärvi exploration area of the Karelian Arctic for noble metals and uranium is shown.

Keywords: *Karelian Arctic, Precambrian, gold, uranium, platinum-group metals, selenium, alkaline-carbonate metasomatic rocks, carbonaceous schists, evaporites.*

Funding

The work was carried out with the financial support of the State Assignment topic of the Institute of Geology, Karelian Research Centre, RAS Assignment topic (State registration no. 225011700925-0).

Acknowledgements

The author is grateful to A. N. Ternovy and G. N. Sokolov for their help in analytical research and translation of the text into English.

Information about the author

Ivashchenko, Vasily Ivanovich, PhD of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (11, Pushkinskaya St., Petrozavodsk, Russia, 185910), e-mail: ivashche@krc.karelia.ru.

© Ivashchenko V. I., 2025