

УДК 553.(41+24)+549.31+553.078(470.22)

## МИНЕРАЛЬНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТО-МЕДНО-СУЛЬФИДНЫХ, БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНО-МЕДНО-УРАНОВЫХ И БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНО-МЕДНО-УРАН-ВАНАДИЕВЫХ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И РУДОПРОЯВЛЕНИЙ КАРЕЛИИ

© 2022 г. **Л. В. Кулешевич<sup>а</sup>, О. Б. Лавров<sup>а, \*</sup>**

<sup>а</sup>Институт геологии Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия

\*e-mail: petrlavrov@list.ru

Поступила в редакцию 27.08.2020 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

Золото-медно-сульфидная, благороднометалльно-медно-урановая и благороднометалльно-медно-уран-ванадиевая минерализация в палеопротерозойских структурах Карельского кратона связана с эволюцией крупной региональной Лапландско-Онежской рифтогенной структуры в свекотенное время. Характерной чертой месторождений и рудопроявлений, формирующихся на орогенном этапе развития, является появление минералов селена. На территории Карелии изучены рудные объекты Онежской, Кумсинской, Пергубской, Северо-Выгозерской, Лехтинской и Елмозерско-Сегозерской отдельных структур, обобщены материалы по рудной минерализации Паана-Куоляярвинской. Концентрации элементов в рудах и околорудных метасоматитах определялись ICP-MS-анализом, содержание отдельных элементов – методом рентгенофлуоресцентного анализа. Рудные минералы изучались методом сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что руды изученных месторождений и рудопроявлений представлены геохимической ассоциацией элементов, включающих Cu, Au, Ag, Pb, Mo, Pd, Pt, Co, Ni, U, Se, Bi, Te, As, V, PЗЭ, Ba, Fe (в разных соотношениях). Прожилково-вкрапленная рудная минерализация сопровождается низкотемпературными метасоматитами – щелочными (альбититами, эйсититами), железо-магнезиальными, слюдитами или березитами, приуроченными к зонам деформаций во вмещающих палеопротерозойских толщах. Изменениям подвергались базальты, кварцитопесчаники и карбонатные отложения ятулийского надгоризонта, углеродсодержащие, основные и ультраосновные толщи людиковийского надгоризонта, а также прорывающие их габбродолериты. Рудная минерализация благороднометалльно-медно-уран-ванадиевых и благороднометалльно-медно-урановых месторождений и проявлений (в которых благородные металлы – преимущественно Au, Pd) представлена сульфидами и селенидами меди, свинца, серебра, золота, палладия, реже платины, самородным золотом, более редкими – висмутом, висмутотеллуридами, а также уранинитом, ванадиевыми слюдами, молибденитом, минералами PЗЭ, гематитом, гетитом, являющимися типоморфными минералами этих месторождений и проявлений. Среди гидротермальных селенидов установлены клаусталит, науманнит, фишессерит, палладсеит, палмаит, судовиковит, богдановичит, парагуанахуатит, эвкайрит, умангит, клокманит, тиманнит, тиррелит, кадмоселит, а также селенсодержащие сульфиды (Se-малышевит, вейбуллит, селеногаленит, Se-содержащие борнит, халькозин, молибденит). В зонах окисления обнаружены самородный селен, селенаты. Типоморфные ассоциации Au–Cu-сульфидных месторождений и проявлений в более эродированной центральной части Карельского кратона представлены халькопиритом, борнитом, пиритом, встречаются галенит, молибденит, сульфиды серебра, золото, электрум, Se-содержащий халькозин, а также гематит. Селениды в этих рудах менее распространены, среди них установлены клаусталит, науманнит, богдановичит, фишессерит.

**Ключевые слова:** золото-медно-сульфидная, благороднометалльно-медно-урановая, благороднометалльно-медно-уран-ванадиевая минерализация, типоморфные минералы, селениды, селен, селенаты, палеопротерозойские структуры, метасоматиты, Карелия

**DOI:** 10.31857/S0016777022030042

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, в связи с открытием золото-урановых (Au–U) и золото-медно-сульфидных (Au–Cu–S) месторождений в Северной Финлян-

дии, возрос интерес к комплексным рудным объектам, содержащим разнообразный набор элементов – U, Cu, Au, Ag, Pb, Se, Pd, Pt, Bi, Te, As, Co, Ni, Mo, так называемой “атипичной” ассоциации (в русскоязычной литературе выделяемой

как пяти- или полиэлементной рудной формации). Как отмечают специалисты по урану, открытие группы золото-урановых рудных объектов типа Ромпас в Финляндии резко повысило перспективы восточной части Фенноскандинавского щита на выявление крупных месторождений, представляющих промышленный интерес (Афанасьева, Миронов, 2013).

В рудах этих месторождений совместно с благородными металлами встречается селен. Он образует селениды, являющиеся типоморфными и наиболее распространенными минералами в благороднометалльно-медно-урановых (благороднометалльно-Cu-U), благороднометалльно-медно-уран-ванадиевых (благороднометалльно-Cu-U-V) и Au-Cu-сульфидных рудах. В природе селен относится к малораспространенным элементам, его кларк в земной коре —  $5 \times 10^{-6}\%$  (0.05 г/т). В рассматриваемой группе низкотемпературных гидротермальных месторождений селен образует как собственные минералы, так и может изоморфно замещать серу в сульфидах. В зоне окисления встречается в селенатах и реже как самородный элемент. Селен обычно добывается попутно из шламов Se-содержащих никелевых, полиметаллических колчеданных, Au-U руд или даже из углей (Авдонин и др., 2005). В Карелии повышенные (относительно кларка в земной коре) концентрации Se (1–12 г/т) приурочены к шунгитоносным толщам людиковийского надгоризонта. Более высокие концентрации (25–1600 г/т и выше) и минеральные формы установлены в рудах благороднометалльно-Cu-U, благороднометалльно-медно-U-V (где благородные металлы представлены Au, Pd, Pt) и Au-Cu-сульфидных месторождений и проявлений в палеопротерозойских структурах Карельского кратона.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНО-МЕДНО- УРАНОВЫХ, БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНО- МЕДНО-УРАН-ВАНАДИЕВЫХ И ЗОЛОТО-МЕДНО-СУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПРОЯВЛЕНИЙ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ТОЛЩАХ ЛАПЛАНДСКО-ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ

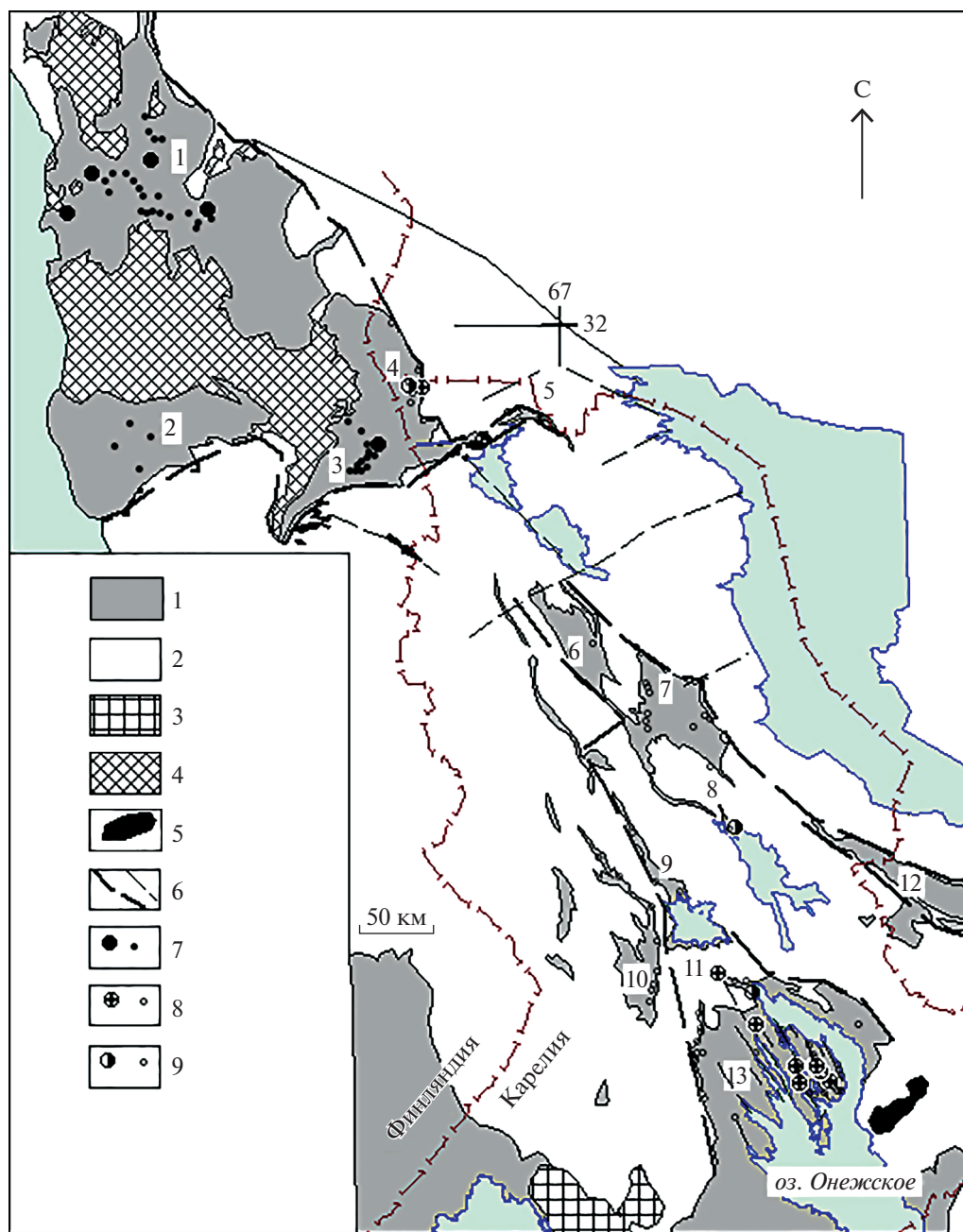
Благороднометалльно-Cu-U, благороднометалльно-Cu-U-V и Au-Cu-сульфидные руды Карельского кратона приурочены к зонам складчато-разрывных или сдвиговых деформаций в ятулийско-людиковийских толщах палеопротерозойских структур Карелии и Северной Финляндии (фиг. 1). В региональном плане все эти локальные структуры связаны с многоэтапным развитием Лапландско-Онежского рифта. Эта крупная рифтогенная структура заложилась 2.5 млрд лет назад и развивалась до 1.7 млрд лет (в карельской части). Орогенические процессы в ней

проявились в свекофенское (~1.78 млрд лет) и в раннерифейское (~1.6–1.46 млрд лет) время в южной его части — в Онежской структуре (Goltsin et al., 2008; Глебовицкий и др., 2014). Со свекофенским этапом развития связываются главные складчато-разрывные деформации и метасоматические изменения пород, сопровождающиеся благороднометалльно-Cu-U, благороднометалльно-Cu-U-V и Au-Cu-сульфидной минерализацией.

На территории Северной Финляндии выявлены золото-(кобальт)-медно-сульфидные и благороднометалльно-урановые рудные объекты, представленные месторождениями и проявлениями Юома-суо, Хангаслампи, Ромпас, Перяпохья, Вахайоки, Сааттопора, Пахтаваара, Суурикуусикко, Левиярви, Куотко и рядом других в мезо- и палеопротерозойских зеленокаменных толщах Центральной Лапландии, в сланцевых поясах районов Куусамо и Перяпохья (фиг. 1).

Некоторые Au-Cu-сульфидные и Au-Cu-U месторождения в финской Лапландии имеют значительные ресурсы (Суурикуусикко), отдельные из них разрабатываются, разведываются, либо отработаны (Калинин, 2018; Полеховский и др., 2019; Eilu, 1999; Eilu, Niiranen, 2002; Korkalo, 2006; Niiranen, 2004; 2005; Eilu et al., 2007; Gold..., 2007; Patison, 2007; Patison et al., 2007; Vanhanen, 2001; Vanhanen et al., 2015; Wyche et al., 2015). Систематизируя все полученные данные, финские геологи выделяют несколько типов рудных объектов, приуроченных к зонам деформаций: 1 — гидротермальные орогенической группы, золото-сульфидные (либо S-As); 2 — золото-медно-сульфидные с атипичной геохимической ассоциацией (Au, Cu, Ni, Co, Mo, Bi, Te, As, U, P3Э). К 3-й группе относятся палеороссыпные в осадках и конгломератах. В связи с открытием крупнейшего Fe-O-Cu-Au-P3Э-U месторождения Олимпик Дэм в Австралии (возраст ~1.5 млрд лет) (Roberts, Hudson, 1983; Reynolds, 2000) в последние десятилетия в мире особенно возрос интерес к комплексным железо-оксидно-золото-медным объектам и родственными им золото-медно-сульфидным месторождениям (Соловьев, 2011). Подобный тип рудных объектов IOCG-типа (железо-оксидно-золото-медно-сульфидные) был особо выделен в отдельную 4 группу (Niironen, 2004, 2005). Отложению оруденения предшествовал щелочной метасоматоз (формирование альбититов, эйситов), протекавший в условиях повышенной NaCl-солености (Barton, Johnson, 1996; Frietsch et al., 1997; Леденева, Пакульнис, 1997).

Рудные объекты, подобные Северной Финляндии, прослеживаются и в северо-западной Карелии, где представлены в палеопротерозойских толщах Паана-Куоляярвинской структуры. В цен-



**Фиг. 1.** Месторождения и рудопроявления Au–Cu–S, благороднометалльно–Cu–U и благороднометалльно–Cu–U–V Лапландско–Онежской рифтогенной структуры. 1 – протерозойские отложения (PR<sub>1-2</sub>), 2 – архейские отложения (AR), 3 – рифейские гранитоиды (R), 4 – мезопротерозойские гранитоиды (PR<sub>2</sub>), 5 – раннепротерозойские (сумийские) базит–гипербазитовые интрузии (PR<sub>1</sub>), 6 – зоны, контролирующие рифтогенную структуру и сопряженные смещения, 7 – благороднометалльные (Au–Cu–S, Au–Cu–U) месторождения и проявления Лапландии. Месторождения и проявления Карелии: 8 – благороднометалльно–Cu–U, благороднометалльно–Cu–U–V, 9 – Au–Cu–сульфидные и золотосодержащие. Протерозойские геологические структуры: 1 – Центральная Лапландия, 2 – Перяпохья, 3 – Куусамо, 4 – Паана–Куоляярвинская (или Салла–Куоляярвинская), 5 – Кукасозерская, 6 – Гайкольская, 7 – Лехтинская, 8 – Северо–Выгозерская, 9 – Елмозерско–Сегозерская, 10 – Янгозерская, 11 – Кумсинская, 12 – Ветреный Пояс, 13 – Онежская.

тральной и южной части Лапландско–Онежской рифтогенной структуры на Карельском кратоне они фиксируются цепочкой небольших Au–Cu–сульфидных (или золотосодержащих) проявлений

в Лехтинской, Северо–Выгозерской, Елмозерско–Сегозерской структурах и рядом более значимых благороднометалльно–Cu–U или благороднометалльно–Cu–U–V проявлений и месторождений

в Кумсинской и Онежской структурах (фиг. 1). Рудная минерализация в этих палеопротерозойских структурах приурочена к зонам северо-западных деформаций и низкотемпературного щелочного и сопряженного железо-магнезиального метасоматоза в породах ятулийского (2.3–2.1 млрд лет) и людииковийского (2.1–1.92 млрд лет) возраста, основного, карбонатного и иного состава, а также шунгитоносным толщам.

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследований были образцы руд и метасоматитов с благороднометалльно-Cu-U, благороднометалльно-Cu-U-V и Au-Cu-сульфидной вкрапленно-прожилковой или гнездовой минерализацией из протерозойских месторождений и рудопроявлений Карельского кратона. Изучалась рудная минерализация с месторождений и рудопроявлений Онежской структуры (Средняя Падма, района Великой Губы), шунгитоносные породы с сульфидной вкрапленно-прожилковой минерализацией (Максово), благороднометалльно-Cu-U, Au-Cu-S и золотосодержащая медно-сульфидная минерализация Кумсинской (Светлое, Медные горы), Пергубской (Воронов Бор), Северо-Выгозерской (Воицкое), Лехтинской и Елмозерско-Сегозерской структур (Шуезерское, Халозеро, Мойна), в которых авторами проводились детальные геологические и металлогенические исследования. По Паано-Куолаярвинской структуре приводятся обобщенные результаты исследований, опубликованные в литературе.

#### *Благороднометалльно-медно-урановые и благороднометалльно-медно-уран-ванадиевые месторождения и рудопроявления*

Онежская структура находится в южной части Лапландско-Онежского рифта (фиг. 1). Эта синклиновая структура представлена чередованием синклинальных и антиклинальных складок, сложенных породами ятулийского, людииковийского (заонежского и суйсарского горизонтов) и калевийского надгоризонтов (Онежская..., 2012). Благороднометалльно-Cu-U-V минерализация Онежской структуры (фиг. 2), проявлена практически на всех обнаруженных здесь рудных объектах. Вмещающие толщи представлены шунгитами, метапелитами, базальтами и туфами основного состава людииковийского надгоризонта, а также карбонатными породами ятулийского надгоризонта. Структурная позиция оруденения и сопровождающих их метасоматитов определяется приуроченностью их к северо-западным зонам деформаций и участкам северо-восточного перегиба ундулирующих осей складок третьего порядка (перехода антиклиналь-синклиналь). Протя-

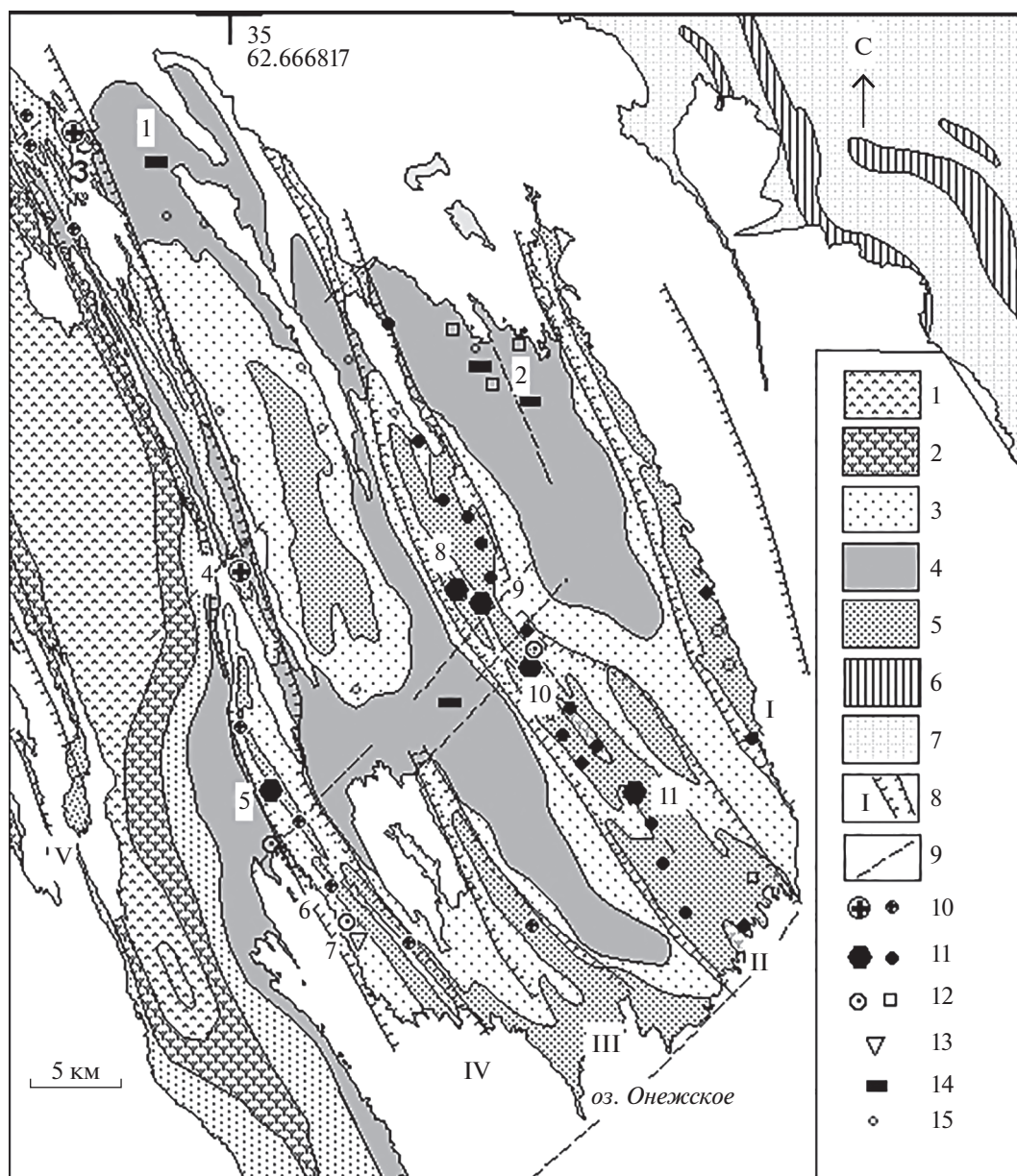
женность зон метасоматитов бывает значительная – до 10 км (Металлогения Карелии, 1999). Благодаря работам горно-геологического предприятия “Невскгеология”, проводимым в 1982–1991 годах Ю.В. Петровым и в 1992–1994 годах Ю.А. Самойленко, рудные объекты хорошо изучены. Выявлено пять крупных месторождений и более десяти перспективных рудопроявлений ванадиевых руд (Минерально..., 2005), обладающих уникальными минералого-геохимическими особенностями (с U, Cu, Mo, ЭПГ, Au, Ag компонентами).

Наиболее значительные концентрации V, U, Cu, благородных металлов были установлены на месторождениях южной части Тамбицкой зоны складчато-разрывных деформаций (СРД). Это месторождения Средняя и Верхняя Падма, Царевское, Весеннее, названные объектами падминского типа (Металлогения Карелии, 1999; Минерально-сырьевая..., 2005). Уран-ванадиевая рудная минерализация была обнаружена в низкотемпературных карбонатсодержащих альбититах (эйситах) и слюдитах (представленных V-Cr-Mg-слюдами), приуроченных к участкам флексурных перегибов или деформаций, осложненных трещинами отслоения вблизи контакта разнородных толщ (Билибина и др., 1991; Мельников и др., 1992; Мельников, Шумилин, 1995). Щелочные метасоматиты установлены до глубины 0.5–1.5 км (от уровня эрозионного среза).

На месторождении Средняя Падма было установлено 11 рудных тел, глубина залегания которых находится на 55–310 м от уровня поверхности (Минерально-сырьевая..., 2005). Наиболее богатые уран-ванадиевые руды месторождения Средняя Падма приурочены к внутренним зонам метасоматитов, образующим пологозалегающие секущие тела в трещинах отрыва (с падением 0°–20° на СВ). Руды представлены настуран-роскоэлитовым и благороднометалльно-сульфидно-настуран-роскоэлитовым минеральными типами.

В районе поселка Великая Губа в центральной части Онежской структуры расположено несколько уран-ванадиевых рудных объектов с благородными металлами и селенидами, объединенных в так называемую космозерскую группу (фиг. 2). Рудные объекты представлены месторождением Космозеро, проявлениями Южно-Космозерское, Великая Губа. Их размещение контролируется Святухинско-Космозерской зоной складчато-разрывных деформаций и интенсивных щелочно-слюдистых изменений пород (фиг. 2, зона IV). Некоторые рудопроявления сопровождаются полиметаллической минерализацией и кварц-самоцветной сырьем (Великая Губа, Кондобережская). Большинство залежей U-V руд приурочены к карбонатно-слюдисто-альбитовым метасоматитам по алевролитам и доломитам. Руды содержат прожилково-вкраплен-





**Фиг. 2.** Размещение месторождений и рудопроявлений на Заонежском полуострове, Онежская структура (по материалам Карельской ГЭ и “Невскгеология”). Вмещающие толщи: 1 – отложения калевийского надгоризонта; 2–4 – людиковийский надгоризонт (2 – вулканиты суйсарского горизонта; 3 – основные вулканиты и габродолериты заонежского горизонта; 4 – шунгитоносные толщи); 5 – ятулийский надгоризонт (карбонатные, алевролиты, аргиллиты); 6 – габродолериты, Пудожгорский силл; 7 – гранитогнейсы, архей; 8 – зоны складчато-разрывных деформаций (I – Кузарандовская, II – Тамбицкая, III – Нумицкая, IV – Святухинско-Космозерская, V – Уницкая); 9 – СВ сдвиговые зоны. Рудные объекты: 10 – благороднометалльно-Cu-U, 11 – благороднометалльно-Cu-U-V руды, 12 – полиметаллические руды и сульфидная вкрапленная (колчеданная) минерализация, 13 – кварц-самоцветное сырье, 14 – шунгитовые месторождения, 15 – сульфидная медная минерализация в габродолеритах. Месторождения и рудопроявления: 1 – Шуныга, 2 – Максово, Загогино, 3 – Святуха, 4 – Ковдозеро, 5 – Космозеро, Южно-Космозерское, 6 – Великая губа, 7 – Кондобережская, Яндомозеро, 8 – Весеннее, 9 – Верхняя Падма, 10 – Средняя Падма, 11 – Царевское.

ную благороднометалльно-сульфидно-селенидную минерализацию.

На месторождении Космозеро, расположенном севернее пос. Великая Губа, глубина залегания трех рудных залежей варьирует от 50 до 500 м. Рудная зона вытянута в СЗ направлении, приурочена к пере-

гибу складки, рудные прожилки формируют штокверк. Рудопроявление Великая Губа расположено южнее месторождения Космозеро. Кондиционные урановые руды оконтурены в трех залежах, они сопровождаются альбитизацией и карбонатно-слюдистыми метасоматитами (Металлогения..., 1999).

**Таблица 1.** Содержания, запасы и ресурсы благороднометалльно-Cu-U-V месторождений и проявлений Онежской структуры, Карелия

Месторождение или проявление	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> макс./ср.	C/P	UO <sub>2</sub> макс./ср.	C/P	Au макс./ср.	C/P Au	Pd + Pt макс./ср.	C/P ЭПГ	Cu макс./ср.	C/P Cu
	%	млн т	%	т	г/т	т	г/т	т	%	тыс т
м. Средняя Падма	17.8/2.35	2.48/	/0.067	3066/	/0.16	0.729/	/0.31	1.418/	/0.53	—
м. Верхняя Падма	/2.32	0.565	/0.043	240/	/0.21	0.119/	/0.18	0.1/	/0.52	2.9
м. Царевское	14.8/2.33	3.378	/0.066	3300/	—	—	/0.24	1.209/	/0.24	8.1/
м. Космозерское	16.2/4.22	1.405/ 0.24	/0.128	1800/	/0.24	0.332/	/0.4	0.562	/0.84	11.8/ 2.0
м. Весеннее	/3.09	1.204/ 1.456	/0.046	230/	/0.33	/0.166	/0.83	/0.165	6.5/	/4.8
м. Шульгиновское	/2.41	/6.224	0.12/ 0.05	/2800	—	—	—	—	—	—
п. Святуха	1.5	—	0.3/	—	—	—	—	—	—	—
п. Великая губа	/0.5	/0.6	2.15/ 0.08	—	—	—	—	—	—	—
п. Южно-Космозерское	2.0/	—	0.18/	—	—	—	—	—	—	—
п. Яндомозеро	1.0/	—	0.044/	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. С – запасы (C<sub>2</sub> + C<sub>1</sub>), Р – ресурсы (P<sub>2</sub> + P<sub>1</sub>), по (Минерально..., 2005); м. – месторождение, п. – проявление; прочерк – нет данных; макс./ср. – содержание максимальное/среднее.

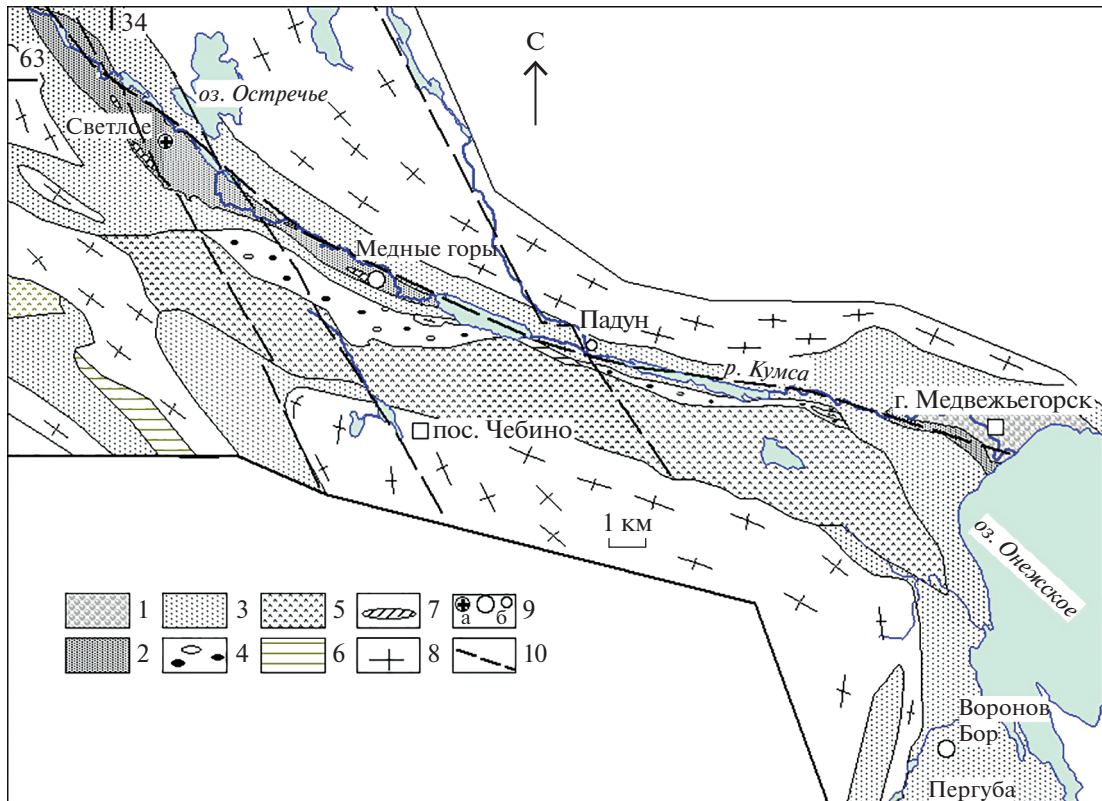
Южнее проявления Великая Губа у деревни Кондобережская (фиг. 2) углеродсодержащие вмещающие толщи секутся кварцевыми жилами, образующими штокверк, представленный разными генерациями сульфидов, селенидов и разновидностями кварца.

Для разведанных месторождений и рудопроявлений падминского типа по результатам производственных работ (Минерально-сырьевая..., 2005) можно составить следующую сводку (табл. 1). Для некоторых из этих объектов авторами детально изучались ассоциации руд и измененных пород.

В палеопротерозое в породах людиковийского надгоризонта (2.1–1.92 млрд лет) Онежской структуры фиксируется значительное накопление биогенного органического вещества, большие мощности черносланцевых отложений и значительные содержания углерода в пелитовых осадках (Онежская..., 2011). Высокоуглеродистые породы шунгитовых месторождений Заонежья (Забогинское, Максово, Шуньга) содержат более 20% С и относятся к комплексному сырью, используемому для получения ферросплавов, специальных строительных материалов и в некоторых иных отраслях промышленности. Для шунгитового сырья, независимо от разновидностей шунгитового вещества и концентрации углерода в нем, требуется низкое содержание примесей S, P, U. По безсульфидным шунгитам можно судить о фоновых концентрациях рудогенных элементов в этих породах как возмож-

ном первичном источнике для переотложенной минерализации. А так как сера в шунгитах связана с сульфидами, изучение вкрапленно-прожилковых сульфидов на месторождениях шунгитов (Кулешевич и др., 2019) проводилось параллельно с исследованиями углеродистого вещества. В зонах брекчирования и участках переотложенного (миграционного) шунгитового вещества возрастает количество сульфидов (пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, молибденит) и появляются селениды полиметаллов. Метасоматиты в таких участках представлены железо-магнезиальными слюдитами. В зонах брекчирования они содержат карбонат, калиевый полевой шпат, апатит. Жильные минералы представлены кварцем, кальцитом.

Онежская структура к северу объединяется с небольшой Пергубской и Кумсинской ятулийскими структурами (фиг. 1, фиг. 3). Вмещающие толщи ятулийского надгоризонта (2.3–2.1 млрд лет) в этих структурах представлены метабазами, кварцитопесчаниками, кварцевыми конгломератами, карбонатсодержащими породами, алевритами. С северо-западными зонами складчато-разрывных деформаций в ятулийских толщах связаны щелочно-железо-магнезиальные изменения пород и проявления благороднометалльно-Cu-U минерализации Светлое, Au-Cu-сульфидных и золотосодержащих месторождений и проявлений Воронов Бор и Медные горы. Благороднометалльно-Cu-U минерализация проявления Светлое



**Фиг. 3.** Схема размещения рудопоявлений в Кумсинской и Пергубинской структурах (по материалам авторов). 1 – четвертичные отложения; ятулийский надгоризонт; 2 – базальты, карбонаты, алевролиты (PR<sub>1</sub>jt<sub>2</sub>); 3 – базальты, кварцито-песчаники (PR<sub>1</sub>jt<sub>1</sub>); 4 – полимиктовые конгломераты (сариолийский надгоризонт, PR<sub>1</sub>sr); 5 – metabазальты и андезитобазальты, туфы (сумийский надгоризонт, PR<sub>1</sub>sm); 6 – лопийский надгоризонт (AR<sub>2</sub>lp); 7 – тела габбродолеритов (PR<sub>1</sub>); 8 – граниты (AR<sub>2</sub>); 9 – месторождения и проявления (а – благороднометалльно-Cu-U, б – Au-Cu-сульфидные); 10 – тектонические нарушения.

приурочена к слюдисто-хлоритовой зоне на контакте основных и карбонатных пород ятулийского надгоризонта и секущих их габбродолеритов (Металлогения..., 1999; Кулешевич и др., 2011). На месторождении Воронов Бор отложению оруденения предшествовала альбитизация, развивающаяся как по кварцито-песчаникам, так и по базальтам (Кулешевич и др., 2009). На рудопоявлении Медные горы интенсивно альбитизированы габбродолериты, в них развиваются альбит, кальцит, хлорит, титанит (Кулешевич и др., 2009). Щелочной метасоматоз завершается образованием секущих медно-сульфидно-кварц-карбонатных прожилков, мощностью от нескольких мм до 10 см, рудная минерализация которых детально изучалась.

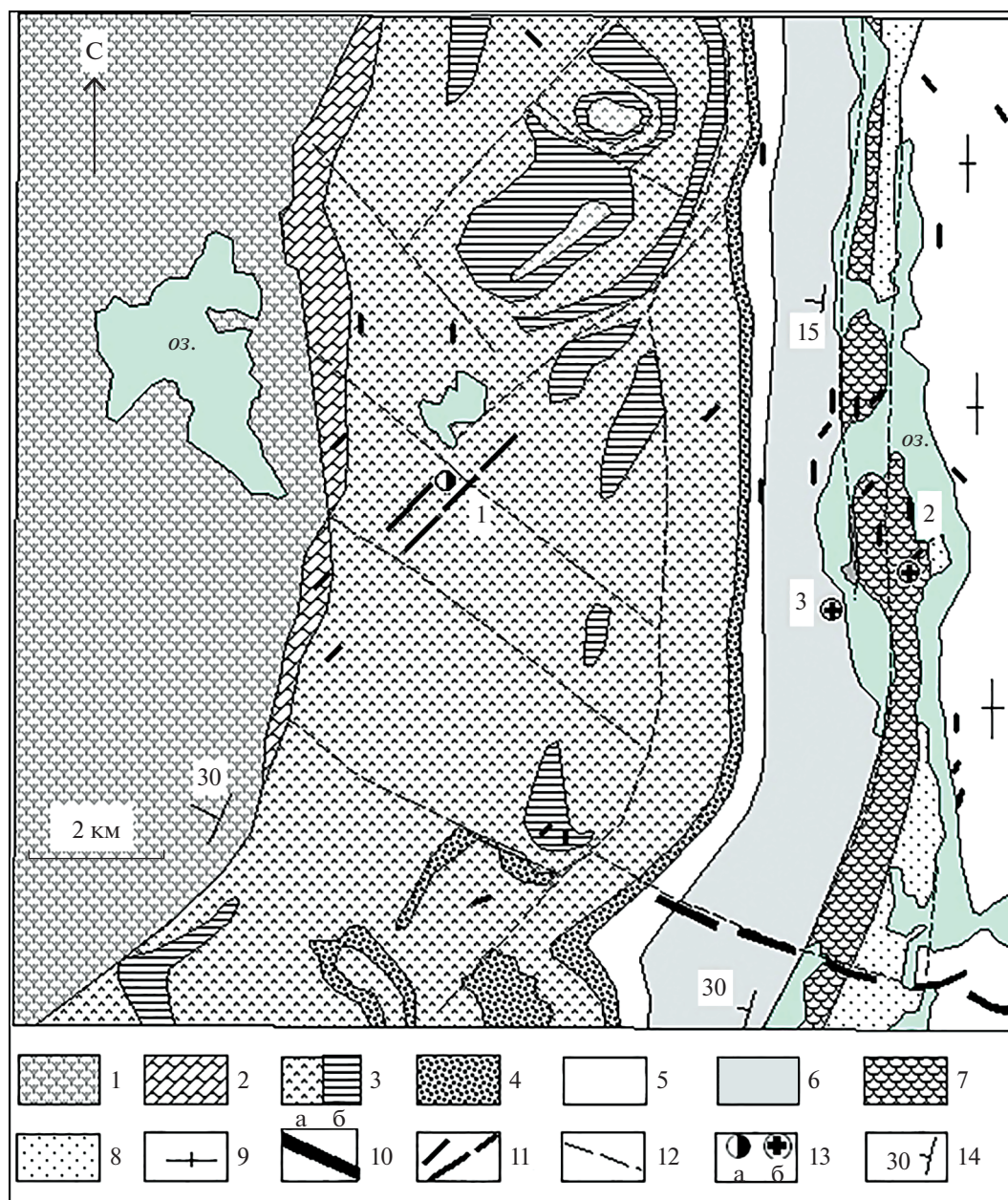
Паана-Куоляярвинская синклиальная структура расположена в северо-западной карельской части Лапландско-Онежской рифтогенной структуры (фиг. 1). Она прослеживается через границу от структуры Салла в Финляндии и сланцевого пояса Куусамо до Паанаярви в Мурманской области и в Карелии, являясь восточным продолжением Центрально-Лапландского зеленокаменного пояса.

Золото-урановые рудопоявления Куоляярвинской части структуры (Алим-Курсуярви, Алакуртти, Лагерное и Озерное) расположены в ее восточном борту (фиг. 4). Они приурочены к зонам деформаций и изменений в ятулийско-людиловских толщах (Калинин, 2013, 2018; Калинин и др., 2014; Колядина, 2017). Центральная зона измененных пород на этих проявлениях сложена альбит-хлоритовыми или альбит-доломитовыми метасоматитами с секущими их кварц-карбонатными жилами с медносульфидной минерализацией.

#### *Золото-медносульфидные месторождения и рудопоявления*

Au-Cu-сульфидные месторождения и рудопоявления Лапландско-Онежской рифтогенной структуры (фиг. 1) расположены преимущественно в центральной более эродированной части Карельского кратона (Кулешевич и др., 2010). Рудная минерализация приурочена к зонам деформаций в ятулийских структурах (2.3–2.1 млрд лет), в которых преобладают вмещающие кварцито-





**Фиг. 4.** Схема размещения месторождений в Паана-Куолярвинской структуре, по (Калинин, 2018). Палеопротерозой: 1 – метабазальты, 2 – доломиты, кварциты, 3 – метабазальты, порфириты (а), силлы габбродолеритов (б), 4 – конгломераты, песчаники, 5 – актинолитовые сланцы, доломиты, 7 – метабазальты и габбро-амфиболиты, 8 – кварциты, кварцитопесчаники, 9 – граниты, неоархей, 10 – дайки габбродолеритов, протерозой, 11 – кварцевые жилы и жилные зоны, 12 – тектонические зоны, 13 – месторождения и рудопроявления Au–Cu–S (кварцевые жилы) (а), Au–U (б): 1 – Майское, 2 – Озерное, 3 – Лагерное, 14 – элементы залегания пород.

чаники, метабазальты и секущие их габбродолериты (2.0–1.98 млрд лет). В менее эродированной Паана-Куолярвинской структуре рудные объекты локализуются в ятулийско-людиковских карбонатсодержащих осадках, базальт-коматиитовых толщах, а также в секущих их дайках габбродолеритов.

В небольшой Пергубской структуре (фиг. 3) к метасоматически измененным породам ниже-

ятулийского надгоризонта (2.3–2.1 млрд лет) приурочено месторождение Воронов Бор, ранее выделяемое как месторождение медистых песчаников (Минерально-сырьевая..., 2005). Вкрапленная, вкрапленно-прожилковая Au–Cu-сульфидная минерализация сечет кварцитопесчаники, кварцевые конгломераты и частично метабазальты. Гнездовая минерализация локализуется преимущественно в кварцитопесчаниках. Ранние из-

менения представлены пропилитами (ассоциацией эпидота, альбита и кальцита), биотитизацией и альбититами в базальтах и кварцито-песчаниках (Кулешевич и др., 2009; Кулешевич, Лавров, 2011). Для изучения были отобраны образцы околорудных метасоматитов, халькопиритовые, борнитовые и халькозиновые руды.

В Северо-Выгозерской структуре находится месторождение Воицкое (фиг. 1), Au–Cu-сульфидные руды которого приурочены к крутопадающим кварцевым жилам мощностью от 0.5 до 4 м. Жилы секут кварцито-песчаники ятулийского надгоризонта и имеют северо-восточное и частично северо-западное простирание ( $40^\circ$ – $45^\circ$  и  $320^\circ$ ). Около-жилные изменения представлены березитами, сульфиды меди – халькопиритом и борнитом. Месторождение было отработано на медь с попутной добычей золота еще в XVIII веке (в соответствии с технологическими возможностями того времени). При строительстве Беломорско-Балтийского канала выработки были частично затоплены. По современным оценкам, среднее содержание Cu в рудах составляло 1.3%, Au 1.9 г/т (Минерально-сырьевая..., 2005; Кулешевич, Лавров, 2010, 2012). Изучались медно-сульфидные (халькопиритовые и борнитовые) золотосодержащие рудные ассоциации.

К наиболее значительным проявлениям Лехтинской и Елмозерско-Сегозерской структур (фиг. 1) относятся Au–Cu-сульфидные. В Лехтинской структуре руды проявлений Шуезерское и Хахлозеро приурочены к дайкам габбродолеритов (с возрастом 2.0–2.06 млрд лет) и вмещающим их кварцито-песчаникам. Формирование низкотемпературных альбититов (эйситов) и хлоритизация предшествовали образованию халькопирит-кварц-карбонатных жил. На проявлении Шуезерское габбродолериты имеют северо-западное простирание, а секущие их альбититы – северо-восточное с аз.  $45^\circ$  (угол падения  $35^\circ$ – $45^\circ$ ). Мощность халькопирит-карбонат-кварцевых жил, секущих альбититы, составляет 1–3 м, гнезд – до 5 м. Жилы образуют штокверковую зону протяженностью до 350 м при ширине 30–150 м. Изучались образцы халькопиритовых и галенит-кварцевых рудных жил, содержащих золото и серебро. В Елмозерско-Сегозерской структуре небольшие золотосодержащие медносульфидные проявления – Ньюралампи, Мойна, Кеч и некоторые другие были обнаружены при поисках меди еще в XIX–начале XX века. На проявлении Мойна альбититы с медносульфидно-карбонат-кварцевыми жилами секут габбродолериты.

В восточном борту Паана-Куоляярвинской структуры в 70-х годах прошлого века была обнаружена система линейных кварцевых жил (СВ и СЗ простирания) и штокверки с Au–Cu-сульфидной минерализацией. Долгое время эти исследо-

вания оставались в забвении. И лишь открытие многочисленных протерозойских проявлений и месторождений в Северной Финляндии – Лапландии (Eilu, Pankka, 2007) послужили основным толчком для новых активных поисковых работ и на российской территории (работы ГПП “Невскгеология”, ВСЕГЕИ, ГИ Кольского НЦ РАН). Были обнаружены новые золото-сульфидные и золото-теллурические проявления и детально изучены ранее известные (Калинин, 2013, 2018; Калинин и др., 2014). В центральной части структуры (фиг. 4), на небольшом частично отработанном месторождении Майское метасоматические изменения по основным породам представлены ранними пропилитами и последующей альбитизацией. Измененные вмещающие породы секутся кварцевыми жилами, имеющими северо-восточное простирание. На контакте этих жил развиваются микроклин, Ва-содержащий калишпат, гиалофан, хлорит, биотит; этот тип изменений был отнесен к гумбеитам. В альбандах жил установлены сульфиды меди, золото и более редкие минералы (Порицкий и др., 1993; Сафонов и др., 2003; Вольфсон и др., 2005; Калинин и др., 2018). В северо-восточном борту Паана-Куоляярвинской структуры на рудопроявлении Кайралы кварцевые жилы секут пропилитизированные основные и ультраосновные толщи. Наряду с сульфидами меди они содержат вкрапленно-прожилковую золото-теллурическую рудную минерализацию (Войтеховский и др., 2009, 2010; Чернявский и др., 2012; Калинин и др., 2014).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минеральный состав благороднометалльно-Cu–U, благороднометалльно-Cu–U–V и Au–Cu-сульфидных руд и нерудных ассоциаций метасоматитов с вкрапленной, вкрапленно-прожилковой или гнездовой минерализацией определялся в аншлифах и шлифах оптическими методами под микроскопом. Все определения состава руд и минералов проводились в Центре аналитических исследований ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск). Состав рудных минералов изучался с использованием электронного сканирующего микроскопа (СЭМ) VEGA II LSH (фирмы Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy-350 (аналитик А.Н. Терновой). Ускоряющее напряжение 20 кВ. Ток зонда от 100–200 пА. Электронная пушка: вольфрамовый катод с термоэлектронной эмиссией. Скорость сканирования 60–150 с на точку. Детектор вторичных электронов (SE) ET типа, высокочувствительный детектор отраженных электронов – (BSE). Калибровка проводилась по контрольному образцу кобальта. Среднеквадратичное отклонение для анализируемых элементов и оксидов не превышало 1–2 мас. %. Отдельные мелкие зерна минералов (<2–5 мкм) из-за за-

хвата вмещающей матрицы были проанализированы качественно: их состав был пересчитан на 100%. Изображения минералов представлены в обратно отраженных электронах (BSE).

Компонентный состав руд и измененных пород, содержание отдельных элементов (Cu, S) определялось рентгенофлуоресцентным методом на приборе ARL ADVANT'X (Thermo Fisher Scientific, Швейцария). Подготовка и определение массовой доли элементов рентгенофлуоресцентным анализом (РФА) в образцах проводилось по существующей приборной методике. Количественный расчет осуществлялся с использованием 24 эталонных образцов горных пород, полуколичественный — на основе заводской калибровки, с использованием программного обеспечения рентгенофлуоресцентного спектрометра и пакета прикладных программ (аналитик С.В. Бурдюх). Чувствительность метода количественного определения элементов — 0.001%.

Концентрации малых рудогенных, редких и редкоземельных элементов определялись на квадрупольном масс-спектрометре XSeries 2 ICP-MS (Thermo Scientific, США). Метод ICP-MS основан на использовании индуктивно-связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра для их разделения и детектирования. Разложение образцов проводили путем кислотного вскрытия в открытой системе (по существующей методике). Для анализа использовали навески образцов массой 0.1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводили разложение контрольных образцов (холостых проб) и стандартных образцов СГД-2А, ВНВО-2. Определение массовой доли элементов в образцах проводили количественным методом с использованием эталонных растворов, содержащих 1, 10, 50 и 100 мкг/л определяемых элементов по существующим параметрам работы спектрометра и параметрам процедуры измерения масс-спектров. Число сканирований составляло 100; время измерения на канал — 320 мкс; режим регистрации — счет импульсов. Обработку масс-спектров и расчеты содержания элементов в пробах проводили с использованием программного обеспечения масс-спектрометра и пакета прикладных программ (аналитик А.С. Парамонов). Массовая доля элементов (от Li — до U), определяемых в образце, рассчитывалась как среднее значение, измеренное по их изотопам с существующими пределами обнаружения для каждого элемента.

Результаты радиологического датирования руд и околорудных измененных пород разными методами приводятся по ранее опубликованным данным (Билибина и др., 1991; Бушмин и др., 2013; Бороздин и др., 2014; Кулешевич и др., 2019). Для ряда рудопоявлений (Светлое, Медные горы,

Воронов Бор, Воицкое, Максово, Шуезерское, Хахлозеро) Rb/Sr датирование выполнено по образцам авторов (Глебовицкий и др., 2012, 2014; Кулешевич и др. 2011).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

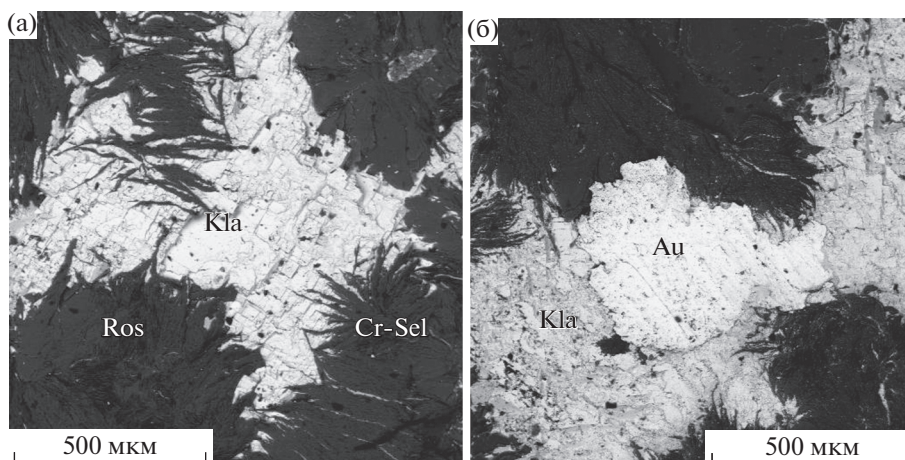
*Месторождение Средняя Падма, Онежская структура.* Рудная минерализация Средней Падмы представлена разными минеральными ассоциациями, приуроченными к разным зонам метасоматической колонки (Полеховский, Волошин, 1990; Леденева, Пакульнис, 1997; Кулешевич, Голубев, 2012). Среди них выделяются фланговые зоны альбитизации с пиритом и гематитом и центральные зоны мелкозернистых слюдитов и жильных крупночешуйчатых Cr–V-слюдитов с благороднометалльно-селенидными прожилками. В рудной зоне встречаются участки наложенного пострудного зарастания секреторных полостей, представленные кварцем, гетитом, баритом. Промышленное значение на месторождении имеют ванадиевые и урановые руды центральных зон. К ним чаще всего и бывают приурочены прожилки с селенидами (клаусталитом) и минералами благородных металлов.

Прожилково-вкрапленная минерализация периферических зон альбититов в изученной метасоматической колонке Средней Падмы представлена вкрапленными сульфидами и селенидами. Среди них установлены в основном пирит, в меньшем количестве халькопирит, сфалерит, галенит, клаусталит, борнит и реже минералы более поздних стадий, в том числе барит.

Рудная минерализация внутренней зоны метасоматитов (Cr–V-слюдитов) включает уранинит, настуран, коффинит, монтрозеит, кальцит. Зона крупночешуйчатых слюдитов содержит прожилково-гнездовую селенидно-карбонатную минерализацию, представленную клаусталитом PbSe, парагуанахтитом Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, богдановичитом AgBiSe<sub>2</sub>, галенобисмутитом Pb(Se,S), вейбуллитом Pb<sub>6</sub>Bi<sub>8</sub>(Se,S)<sub>18</sub>, клокманнитом CuSe, шапбахитом (Ag<sub>0.4</sub>Pb<sub>0.2</sub>Bi<sub>0.4</sub>)S, самородным золотом, серебром, минералами платиновой группы, реже самородной медью. Bi-S-Se-минералы платиновой группы представлены сложными многокомпонентными соединениями — висмудидами, сульфоселенидами, селеносульфидами. Среди них были выявлены селениды благородных металлов — падмаит PdBiSe, судовиковит PtSe<sub>2</sub>, более сложные Pd–Se–S–Bi- и Pt–Bi–Se-фазы, а также установлены мальшевит PdCuBiS<sub>3</sub>, соболевскит PdBi, фрудит PdBi<sub>2</sub>, инсизваит Pt(Bi,Sb)<sub>2</sub>, полярит Pd(Bi,Pb) (Полеховский и др., 1991,2, 1997; Черников и др., 2006).

Изученные нами минералы селенидных прожилков из зоны крупночешуйчатых Cr–V-слюди-





Фиг. 5. Au–Pd-содержащие клаусталитовые прожилки Средней Падмы: а – клаусталит (Kla), Cr–V-селадонит (Cr-Sel), роскоэлит (Ros); б – золото в клаусталите. Образец не полирован, изображения в BSE.

тов (роскоэлитов и хром-селадонитов) представлены клаусталитом, Se-галенитом (0.54–7%), золотом, соединениями Pd и Pt с Bi, S, Se (фиг. 5, табл. 2). В ассоциации с ними встречаются пирит, халькопирит, а также Zn–Cr–V-шпинели ряда цинкохромит ( $ZnCr_2O_4$ ) – кулсонит ( $FeV_2O_4$ ), Fe-олхонскит ( $Cr, Fe, V)_2Ti_3O_9$  и включения браннерита  $UTi_2O_6$  (Кулешевич, Голубев, 2012). Клаусталит PbSe – основной минерал прожилков (табл. 2), срстается с крупночешуйчатой слюдой (фиг. 5а). Он выделяется позднее сульфидов, цементирует их, при окислении незначительно замещается молибдоменимом  $PbSeO_3$ . В срстании с клаусталитом установлены золотины размером от 2–30 мкм до видимых в 2–4 мм (фиг. 5). Золото содержит 5.41–8.58% Ag, иногда примесь Se до 0.54–0.77%, пробность 910–945 (табл. 2, анализы 2–3). На контакте золота с клаусталитом образуются палладистый купроаурид  $(CuPd)_2(Au, Ag)_3$  (табл. 2, анализ 4), малышевит  $PdCu(Bi)S_3$  (табл. 2, анализы 5–7), а также более сложные Pd–Cu–Bi–Pb–Se–S-соединения и мончеит  $PtBi_2$ . Pd-купроаурид выделяется на контакте золота с малышевитом. По микротрещинкам он проникает в золото. В подобных ассоциациях ранее были установлены малышевит, падмаит  $PdBiSe$ , судовиковит  $PtSe_2$  (табл. 2, анализы 8–12).

Месторождение Средняя Падма подготовлено к освоению. Содержание полезных компонентов в рудах Средней Падмы составляет (см. табл. 1): среднее  $V_2O_5$  – 2.35% (достигает 17.8%),  $UO_2$  0.067%, Cu 0.53%, Au 0.16 г/т (достигает 40–250 г/т, по данным производственных работ), Ag до 1500 г/т, ЭПГ – 0.31 г/т (Pd до 150–400 г/т, Pt до 30–56 г/т). Метасоматиты содержат повышенные концентрации Cr, Ni, Co, Se, а также Mo. Молибденитовую минерализацию в рудах сопровождает Re (11–50 г/т). При среднем содержании Mo в рудах

0.022%, запасы категории C1 составляют 0.86 тыс. т, C2 – 0.167 тыс. т (Минерально-сырьевая..., 2005). На других месторождениях падминской группы среднее содержание Mo составляет 0.12–0.3%.

Отложение Cr–V-слюд, а затем кварц-карбонатных прожилков с урановой минерализацией, сульфидами, селенидами и благородными металлами происходило при снижающейся температуре от 305–245 до 120°C (выделение клаусталита и соединений с благородными металлами) и затем прожилков пострудного этапа – при 150–50°C. Соленость растворов была высокая – до 40% NaCl-экв. (Леденева, Пакульнис, 1997). Длительность формирования метасоматитов и оруденения в зонах СРД месторождений и рудопроявлений данной группы, установленная различными методами, укладывается преимущественно в интервал ~1.78–1.49 млрд лет, фиксируется влияние более поздних (1.2–1.1 млрд лет) и палеозойских процессов (Билибина и др., 1991; Бороздин и др., 2014).

*Космозерская группа.* На месторождении Космозеро главными промышленными минералами ванадия являются Mg–V-слюды (флогопит, роскоэлит), карелианит  $V_2O_3$ ; урана – настуран, браннерит и минералы окисленной уран-пирролюзитовой ассоциации. Среднее содержание  $V_2O_5$  в рудах составляет 4.22% (достигает 16.2%), запасы руды – 1.405 млн т (табл. 1; Минерально-сырьевая..., 2005). Среднее содержание  $UO_2$  в рудных залежах составляет 0.128%. Селенидно-сульфидные прожилки содержат пирит, сфалерит, галенит (с Se до 0.13–6.13%), сульфиды меди (халькопирит, борнит, халькозин), молибденит, платинит  $Pb_4Bi_7(Se, S)_4$ , клаусталит, науманнит, парагуанахуатит, селениды палладия, встречаются самородные медь, золото. В одной из секущих жил халькопирит-пирит-барит-кальцитового состава мощно-



**Таблица 2.** Типоморфная ассоциация минералов благородных металлов и селенидов месторождения Средняя Падма (мас. %)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S	—	—	—	—	19.75	21.02	21.92	19.0	19.19	12.22	0.27	—
Cu	—	—	—	5.48	11.55	12.90	12.23	13.1	12.89	12.51	—	—
Se	24.48	—	—	—	7.82	—	—	2.2	0.34	7.65	18.56	43.70
Pd	—	—	—	15.68	21.13	23.52	22.54	20.6	22.52	18.87	25.73	2.52
Pt	—	—	—	—	—	—	—	1.0	—	—	1.30	53.38
Pb	74.32	—	—	—	—	—	—	0.8	0.25	15.98	—	—
Bi	—	—	—	—	39.74	42.56	41.94	42.6	45.32	33.28	52.59	—
Ag	—	8.58	6.75	5.9	—	—	—	—	—	—	0.6	—
Au	—	90.65	92.71	71.86	—	—	—	—	—	—	0.04	—
Сумма	98.80	99.23	99.46	98.92	100	100	98.63	99.3	100.52	100.51	99.09	99.60

Примечание. 1 – клаусталит PbSe; 2–3 – золото из клаусталитового прожилка; 4 – палладиевый купроаурид  $(\text{CuPd})_2(\text{Au,Ag})_3$ ; 5–7 – малышевит  $\text{PdCu}(\text{Bi})\text{S}_3$ . Анализы 1–7 – авторские материалы. 8 – малышевит  $\text{PdCu}(\text{Bi})(\text{S,Se})_3$ , по (Черников и др., 2006). 9 – малышевит, 10 – фаза  $\text{Pd}_3(\text{Bi,Pb})_4\text{Cu}_3(\text{S,Se})_8$ , 11 – падмаит  $(\text{PdBiSe})$ , 12 – судовиковит  $\text{PtSe}_2$  (Полеховский и др., 1991, 2; Полеховский и др., 1997). Результаты анализов СЭМ (здесь и далее): прочерк – элемент не обнаружен.

стью 0.5 м установлено содержание Co 0.3% (входит в пирит), Cu 0.3%, Pd 11 г/т, Au 2 г/т, Ag 8 г/т, Mo и Bi до 0.01%, по А.В. Булавину (Металлогения..., 1999). Селен выступает как типоморфный элемент руд и селенидно-сульфидных прожилков. На Южно-Космозерском проявлении урановые рудные тела приурочены к слюдисто-карбонатным метасоматитам тектонической зоны в осевой части складки. Здесь среднее содержание молибдена возрастает до 0.134%, что позволяет выделить также и молибденитовые рудные тела. Минеральные ассоциации руд отражаются в их геохимическом составе – повышенных концентрациях V, U, Ti, Cu, Pb, Zn, Mo, S, Se, Pd, Au, Ag, Bi, Co.

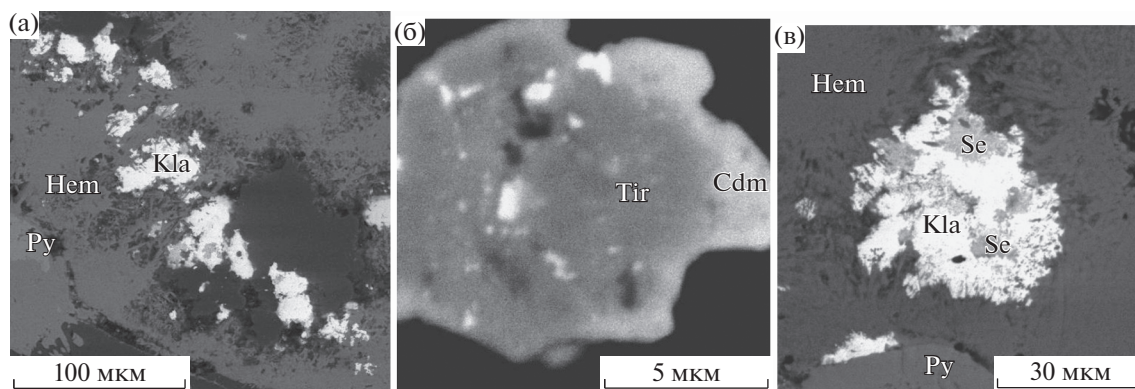
Рудная минерализация *руднопроявления Великая Губа* представлена вкрапленностью настурана, уранованадатами (карнотитом, тюамунитом), Cr–V-слюдами в ассоциации с Cr–V-турмалином, цинкохромитом. В кварцевых жилах встречаются халькопирит, сфалерит, пирит, галенит, клаусталит, окисленная ассоциация представлена халькозином, медью, гематитом, пиролюзитом.

Рудная минерализация *проявления Кондобережская*. На участке, расположенном южнее деревни Великая Губа, шунгитовые толщи секутся кварцевыми жилами, образующими линейный штокверк, представленный разными генерациями и разновидностями кварца (кварц, горный хрусталь, аметист, карнеол), сульфидами, селенидами и гематитом (Лавров, Кулешевич, 2020). Слабоокатанные обломки пород с жилами и жеодами коричневатокрасных карнеол-агатов накопились также и в постледниковом обломочном материале недалекого переноса, сформировав небольшое месторождение камнесамоцветного сырья (карнеол-агатов). Изучение кварцевых жил показало, что они неоднократно

но дробились. Кроме минералов группы кварца, содержат кальцит, пластинчатый барит, сульфиды, селениды, гематит, гетит.

Ранние сульфиды (фиг. 6а) гидротермальной ассоциации представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом (Fe 6–8.4%), галенитом (в том числе селенсодержащим), гринокитом (CdS). Позднее выделяется клаусталит, Cd-содержащий сфалерит (без Fe, с Cd до 4%). Клаусталит замещается более редкими минералами – тиррелитом  $(\text{Cu,Co,Ni})_3\text{Se}_4$  и кадмоселитом CdSe (Se 41.05%, Cd 58.95%) (фиг. 6б, табл. 3). В тиррелите сохраняются реликты клаусталита. При окислении селениды замещаются самородным селеном (табл. 3), сульфиды – гематитом, в пустотах выделяется самородная сера. Новообразованный самородный селен и реликты клаусталита встречаются в окисленных гематит-гетитовых агрегатах (фиг. 6в). Секретионные полости рудных образцов зарастают игольчатым гетитом. Минеральная ассоциация руд отражается в их геохимическом составе – повышенными концентрациями Zn 0.31–4.13%, Cu 0.03–0.17%, а также (в г/т): Cd 3.8–76.5, Ni 78–110, Pb до 150, Mo до 26, Pd 1.47, а также Fe, Se и S.

*Шунгитовые месторождения Заонежья. Максиковская залежь* Зажогинского месторождения представляет собой крупную линзу шунгитовых пород со средним содержанием  $S_{\text{орг}}$  около 30%, называемых максовитами. В неизменных максовитах встречаются единичные включения глобулярного и рассеянного кубического пирита. Для наиболее “чистых” безсульфидных максовитов были определены средние (фоновые) содержания элементов (табл. 4, анализ 1). Концентрации Ti, P, U, V и других рудогенных элементов в них низкие, содержание Se обычно не превышает 4.8–12 г/т, Cu – 41 г/т (табл. 4, анализ 1). В пределах



**Фиг. 6.** Клаусталит, самородный селен и более редкие селениды, проявление Кондобережская: а – клаусталит (Kla), пирит (Py), гематит (Hem); б – тиррелит (Tir) с каймой кадмоселита (Cdm) и реликтами клаусталита (белый); в – клаусталит (Kla), замещается селеном (Se) в гематите. Изображения в BSE.

наложенной гребневидной складки, фиксируемой в СЗ части месторождения по зонам брекчирования в максовитах и подстилающих их туфоалевролитах, развиваются щелочные и железомagneзиальные метасоматиты (Кулешевич и др., 2019). В них увеличивается количество разно ориентированных прожилков с сульфидами (до 15–20% на массу породы), формирующих штокверк. Прожилки состоят из кварца, кальцита, альбита, сульфидов, содержат апатит, иногда монацит и ксенотим. В зальбандах прожилков и зонах брекчий образуется антраксолит (с содержанием  $C_{орг.}$  ~ 93%). Рудная минерализация представлена пиритом, халькопиритом, сфалеритом, встречаются виоларит, кобальтингерсдорфит, Ni-содержащий пирротин, галенит, молибденит, а также клаусталит, науманнит, мелонит, единичные микронные выделения золота, U–Ti-минералы, Nb-содержащий рутил, ильменорутит. Зоны брекчирования и метасоматических изменений обогащены V, P, Ti, Cr, Cu, Zn, As, Mo, Ba, Pb, U, Se до 26–145 г/т (табл. 4, анали-

зы 2–3). В участках с колчеданно-полиметаллической минерализацией резко возрастает содержание Cu, Zn, Co, Ni и Se до 379 г/т (анализ 4).

На *месторождении Шуньга* среднее содержание  $C_{орг.}$  в шунгитах составляет 64%, в жильном антраксолите достигает 98%. Высокоуглеродистые антраксолиты образуются при перекристаллизации шунгитов. На участке деформированных шунгитов с антраксолитом фиксируется значительное обогащение пород V, Ni, As, Mo, U, P (табл. 4, анализ 5), а вблизи шунгитовой залежи месторождения зафиксирована U-аномалия. Как видим, даже в зонах с незначительными деформациями и изменениями в шунгитоносных толщах Заонежья локально наблюдается перекристаллизация углеродистого вещества и его обогащение «атипичной» ассоциацией элементов.

Возраст наложенной сульфидной минерализации с молибденитом, определенный Re/Os методом, равен ~1.56 млрд лет (Кулешевич и др., 2019). Кроме того, среди проанализированных цирко-

**Таблица 3.** Ассоциация рудных минералов в кварцевых жилах проявления Кондобережская (мас. %)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S	14.27	–	–	–	–	2.01	0.63	–	24.88	3.35	–
Se	–	26.79	71.24	71.34	69.67	39.14	41.52	41.30	–	96.63	100
Pb	85.70	71.52	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Cu	–	–	11.63	12.28	9.36	–	–	–	–	–	–
Fe	–	–	1.87	1.32	1.82	–	1.36	–	–	–	–
Co	–	–	7.44	6.80	7.86	–	–	–	–	–	–
Ni	–	–	5.91	6.09	5.63	–	–	–	–	–	–
Cd	–	–	–	–	3.67	56.91	54.18	58.66	78.83	–	–
Сумма	99.97	98.30	98.10	97.83	98.00	98.05	97.68	99.96	103.71	99.98	100

Примечание. Низкотемпературные гидротермальные прожилки: 1 – галенит PbS (Se 0.03–1%), 2 – клаусталит PbSe, 3–5 – тиррелит (Cu, Co, Ni)<sub>3</sub>Se<sub>4</sub>, 6–8 – кадмоселит CdSe, 9 – гринокит CdS. Зона окисления: 10–11 – селен самородный. Прочерк – элемент не обнаружен.

**Таблица 4.** Концентрации рудогенных элементов в шунгитах, измененных в разной степени

Элемент	1	2	3	4	5
Ti, %	0.12	1.6	0.49	0.01	0.17
P, %	0.09	0.46	2.8	—	—
V, г/т	160	544	530	8	1610
Cr	73	127	240	61	126
Co	4	44	400	164	30
Ni	94	482	633	3416	686
Cu	41	800	2037	26581	67
Zn	42	1330	614	14580	194
Se	3	26	145	379	130
As	21	280	214	169	312
Y	10	43	42	3	26
Nb	3	13	20	0.2	11
Mo	9	17	86	30	284
Ba	245	437	1286	11	146
ΣРЗЭ	25	109	248	15	74
Pb	2.6	19	35	37	22
U	6	11	21	0.6	35
n	6	1	1	3	2

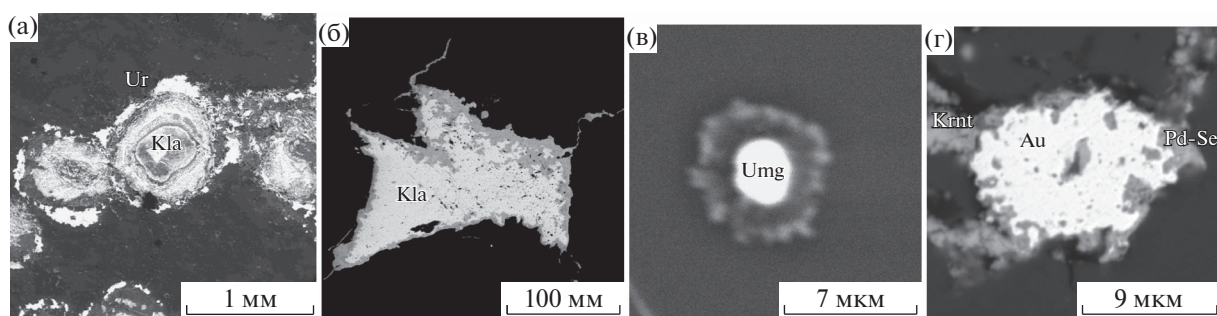
Примечание. Содержания Ti, P (%) определены РФА, остальных элементов (г/т) – ICP-MS-анализ. Месторождение Максово: 1 – шунгиты с незначительным количеством сульфидов, 2 – шунгиты с вкрапленно-прожилковой сульфидной минерализацией, 3 – метасоматиты по шунгитам с прожилками сульфидов (скважина 262), 4 – шунгиты с сульфидами. Проявление Шуньга: 5 – зоны изменения в шунгитах (с антраксолитом). Прочерк – нет определения, n – количество анализов.

нов из шунгитовых месторождений Заонежья выделена большая компактная группа новообразованных гидротермальных цирконов, имеющих раннерифейский возраст  $1573 \pm 46$  млн лет (U–Pb метод), и зафиксированы более поздние изменения ~1200 млн лет (Goltsin et al., 2008).

*Кумсинская структура, рудопроявление Светлое* (фиг. 3). Благороднометалльно–Cu–U минерализация проявления Светлое приурочена к слюдисто-хлоритовой зоне сброса Mg–Fe-компонентов на контакте основных и карбонатных пород ятулийского надгоризонта (Кулешевич и др., 2011). Форма выделения ранних гидротермальных минералов (сульфидов и селенидов) – прожилковая, вкрапленно-гнездовая; у поздних гипергенных ассоциаций, образующихся в приповерхностной зоне окисления, – натечная, почковидная, в виде шариков и зональных сростаний, веточек, игольчатая (у гетита). Рудная минерализация представлена минералами урана, сульфидами (халькопиритом, борнитом, халькозином, реже галенитом, акантитом), селенидами, а также золотом, висмутом (Кулешевич, Лавров, 2020). Среди селенидов наиболее распространен клаусталит PbSe (фиг. 7а, б), реже встречаются низкотемпературные селениды Ag, Cu, Bi, Hg, такие как: Fe-эвкайрит Ag(Cu,Fe)Se, науманнит Ag<sub>2</sub>Se, богдановичит AgBiSe<sub>2</sub>, умангит Cu<sub>3</sub>Se<sub>2</sub>, тиманнит HgSe, гуанахуатит Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (табл. 5, анализы 1–6). Халькозин содержит примесь селена, мелкие включения клаусталита, науманнита и богдановичита размером ~1–5 мкм. В окисленных рудах в ковеллине установлен Se (до 3–7%) и Ag (до 9.96%) (табл. 5, анализы 7–8), в кальците выделяется самородное серебро.

Урановые и урансодержащие минералы рудопроявления Светлое представлены уранинитом, настураном, карнотитом, мелкими чешуйками тюамунита. Карнотит K<sub>2</sub>(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>[V<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]·3H<sub>2</sub>O образует пластинчатые кристаллы в сростании с гематитом и Au–Pd-глобулами (фиг. 7г). Ванадий концентрируется преимущественно в урановых слюдках и меньше в гематите (до 1.6–4%).

Золото (2.6–13% Ag) в рудной зоне встречается в двух генерациях (фиг. 7в–г): 1) в сростании с гидротермальными сульфидами и селенидами; 2) как гипергенное тонкодисперсное в составе Au–



**Фиг. 7.** Рудная минерализация проявления Светлое: а – сростание почек клаусталита (Kla) с халькопиритом, гематитом (серое) и уранинитом (Ur), б – клаусталит (Kla) замещается молибдоменимом (серая кайма), в – умангит (Umg) в кайме халькозина в гематите, г – Au–Pd-глобулы – сростание золота (Au) и палладseite (Pd–Se), карнотит (Krn). Изображения в BSE.

**Таблица 5.** Селениды, Se-содержащие сульфиды и золото проявления Светлое (мас. %)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S	–	4.09	1.60	–	–	–	33.04	29.01	–	–
Cu	–	13.97	–	–	53.96	–	63.85	56.97	–	–
Fe	–	4.07	–	–	–	–	–	–	–	–
Se	29.6	33.13	31.78	36.28	46.05	25.28	3.11	4.07	37.10	–
Pb	70.24	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ag	–	44.75	–	20.80	–	–	–	9.96	–	8.50
Hg	–	–	–	–	–	72.70	–	–	–	–
Bi	–	–	66.14	42.92	–	–	–	–	–	–
Au	–	–	–	–	–	–	–	–	1.92	91.48
Pd	–	–	–	–	–	–	–	–	60.07	–
Сумма	99.84	99.99	99.52	100	100.11	98.0	100	100.01	99.09	99.98

Примечание. 1 – клаусталит PbSe, 2 – эвкайрит Ag(Cu,Fe)Se, 3 – гуанахуатит Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, 4 – богдановичит AgBiSe<sub>2</sub>, 5 – умангит Cu<sub>3</sub>Se<sub>2</sub>, 6 – тиманнит HgSe, 7 – Se-содержащий ковеллин Cu<sub>2</sub>(S,Se)<sub>2</sub>, 8 – Ag и Se-содержащий ковеллин, 9 – палладсеит Pd<sub>17</sub>Se<sub>15</sub>, 10 – золото из ассоциации с палладсеитом. Прочерк – элемент не обнаружен.

Pd-глобул. Гидротермальное золото образует самостоятельные зерна, входит в порпечит (Au,Pd) и купроаурид палладия (Cu,Pd)<sub>3</sub>Au<sub>2</sub>. Иногда в ассоциации с ними и халькопиритом встречается самородный висмут (100% Bi). Гипергенное золото образует глобулы размером 5–30 мкм в сростании с палладсеитом Pd<sub>17</sub>Se<sub>15</sub> и реже арсено-антимонидами палладия.

В зоне окисления сульфиды замещаются халькозином, ковеллином, купритом, реже церусситом, гипсом, а селениды – селенатами. По клаусталиту при окислении образуется молибденомит PbSeO<sub>3</sub> и моттрамит PbCu(VO<sub>4</sub>)(OH).

Содержание ведущих рудогенных элементов на рудопроявлении составляет: Σ(ЭПГ + Au) 0.25–2.86 г/т (золота достигает 20 г/т), Cu 0.18–0.4% (до 2.2%), Pb 0.44–0.6%, U 0.08% (UO<sub>2</sub> до 2.16%), Cr 0.18%, РЗЭ до 628 г/т, Y 392 г/т, V 534–878 г/т, Co 112 г/т, Bi 14 г/т, Se возрастает от 0.18 г/т (в ореоле) – до 1562 г/т (в рудной залежи). Таким образом, рудная зона выделяется по геохимии – повышенными концентрациями U, Cu, Pb, V, Cr, РЗЭ, Se, ЭПГ, Au, менее значимыми Bi. Аномальные концентрации этих элементов фиксируются на всем протяжении от проявления Медные горы до участков Светлое и Фенькина Лампи (фиг. 3). Возраст метасоматитов, сопровождающих рудную минерализацию, определен в 1.63–1.49 млрд лет (Кулешевич, Лавров, 2020).

*Паана-Куоляярвинская структура, Au–U проявление Озерное* (фиг. 4). Во внешнем ореоле метасоматической колонки в пропилитах по габбро рудная вкрапленность представлена пиритом, халькопиритом, ильменитом, магнетитом. В альбититах, альбит-хлоритовых, альбит-доломитовых метасоматитах, установлены гематит, рутил, молибденит, марказит, уранинит, уранофан, браннерит, дави-

дит, из поздних минералов – настуран, казолит, пюямунит (Колядина, 2017; Калинин, 2018; Коваль и др., 2019).

В альбит-карбонатных метасоматитах центральных зон присутствуют ведущие сульфиды – халькопирит, пирит, марказит, молибденит, а также вкрапленная Bi–Te–Se минерализация: мелонит NiTe<sub>2</sub>, алтаит PbTe, фробергит FeTe<sub>2</sub>, магтагамит CoTe<sub>2</sub>, клаусталит PbSe, клокманнит CuSe, кавацулит Bi<sub>2</sub>SeTe<sub>2</sub>, скиппенит Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>Te, золото, реже встречаются раклиджит (BiPb)<sub>3</sub>Te<sub>4</sub>, цумоит BiTe, сильванит AuAg<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>, колорадоит HgTe, богдановичит AgBiSe<sub>2</sub>, паубаит PbBi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>, бамболлаит Cu(Se,Te)<sub>2</sub>, самородный Te (Калинин, 2013; 2018; Калинин и др., 2013, 2014). В молибдените обнаружено повышенное содержание Se и Re. Температура минералообразования снижалась от 400–450 до 100–50°C. Типоморфная геохимическая ассоциация представлена такими элементами, как U, Cu, Mo, Bi, Te, Se. Установлены содержания Cu 1450, Ni 180, Co 32, Pb 236, Bi 312, Mo 1440, Se 216, Te 363, Au 0.4, Ag 12.1, Y 50 в г/т (Калинин, 2018).

Изотопно-геохимические исследования, проводимые в северо-западной Карелии, позволили установить U/Pb возраст метасоматитов Au–U проявлений по рутилу 1756 ± 8 млн лет и близкий ему Rb/Sr возраст по альбиту ~1754 млн лет. U/Pb возраст по ураниниту в альбит-карбонатных метасоматитах равен 1672 млн лет (Калинин и др., 2015; Калинин, 2018), по браннериту – 385 млн лет (близкий возрасту карбонатитового массива Салланлатва – 372 млн лет), что отражает влияние поздних палеозойских процессов.

**Таблица 6.** Теллуриды, селениды и золото рудопроявления Медные Горы (мас. %)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ag	54.59	58.63	62.37	40.25	—	—	0.68	—	73.12	17.41
Te	43.71	41.57	38.63	59.75	46.07	47.79	45.29	—	—	—
Bi	—	—	—	—	52.33	51.95	49.20	—	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—	—	71.82	—	—
Se	—	—	—	—	—	—	—	27.89	26.70	—
Au	—	—	—	—	—	—	—	—	—	81.05
Сумма	98.30	100.21	101.0	100	98.40	99.74	95.17	99.71	99.82	98.46

Примечание. 1–2 – шютцит  $Ag_5Te_3$ , 3 – гессит  $Ag_2Te$ , 4 – эмпрессит  $AgTe$ , 5–6 – теллуровисмутит  $Bi_2Te_3$ , 7 – Ag-теллуrowисмутит, 8 – клаусталит  $PbSe$ , 9 – науманнит  $Ag_2Se$ , 10 – золото (среднее из 10 анализов). Прочерк – элемент не обнаружен.

#### *Месторождения и рудопроявления золото-медносульфидные*

Золото-медносульфидная и золотосодержащая медносульфидная вкрапленно-прожилковая, жильная или гнездовая минерализация встречается в альбититах по габбродолеритам (Медные горы, Шуе-зерское, Мойна) и вмещающих их кварцито-песчаниках (Воронов Бор, Воицкое).

На рудопроявлении *Медные горы* в Кумсинской структуре (фиг. 3) сульфидная медная минерализация приурочена к карбонатным и кварц-карбонатным жилам и прожилкам, секущим альбититы, измененные габброиды и вмещающие толщи. Она представлена халькопиритом, пиритом, реже встречаются сфалерит и галенит, в том числе селенсодержащий. Из сульфидов меди наиболее распространен халькопирит, в его кайме образуется борнит, который при окислении замещается халькозином и гематитом. В связи с тем, что изменяются габбродолериты, все сульфидные прожилки содержат включения титанита и магнетита. Нерудные минералы в зальбандах прожилков представлены альбитом, кальцитом, хлоритом, эпидотом, иногда К-полевым шпатом, баритом, акцессорными монацитом и ксенотимом. Метасоматиты с пиритовой вкрапленностью (в ореоле) и медные сульфидные прожилки содержат Ti до 1.8%, в г/т: V 70–559, Co 13–495, Ni 13–125, Cu 43–1162, Zn 25–179, Mo 0.2–52, Pb 3.6–136, Se 29–47, Te 0.2–5.3, Bi 5, Ag 1.2–29, Au 0.2–1,  $\Sigma$ ЭПГ 0.04–0.53 (до 3.5), U 10–154, Ва до 539, Y 54.5. Содержание меди достигает 3.45%.

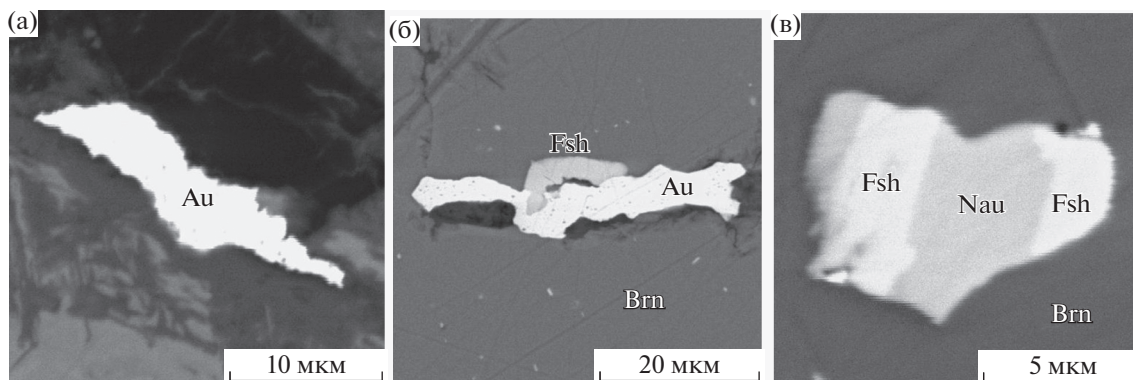
По микротрещинкам в пирит и халькопирит проникают тонкодисперсное (1–50 мкм) золото и теллуриды (табл. 6). Золото содержит Ag 12.34–24.8% (среднее 17.4%). Теллуриды обычно чаще, чем селениды, образуются при изменении габброидов. Среди теллуридов наиболее распространены гессит  $Ag_2Te$ , шютцит  $Ag_5Te_3$ , теллуrowисмутит  $Bi_2Te_3$ , реже встречаются эмпрессит  $AgTe$  и самородный теллур. В ассоциации с ними установлены редкие зерна клаусталита, науманнита и Se-галенита (Se до 7.97%). Околорудные измене-

ния пород и рудообразование происходили при  $T = 265–90^\circ C$  (Кулешевич и др., 2011). Метаморфические изменения габброидов происходили около 1.76 млрд лет назад ( $Pb^{206}/Pb^{207}$  метод по титаниту), образование альбититов и околорудные изменения ~1.5 млрд лет (Rb/Sr метод по альбититам).

*Месторождение Воронов Бор* (см. фиг. 3). Содержание сульфидов меди в рудах месторождения Воронов Бор составляет 10–40%. Медносульфидная минерализация формировалась в близповерхностных условиях: наблюдается смена халькопиритовой минерализации борнит-халькопиритовой и затем борнит-халькозиновой. В рудах установлены молибденит (1–2%), пирит, сфалерит, единичные зерна кобальтина, арсенопирита, галенита, акантита, а также селениды и более редкие минералы – рениит  $ReS_2$ , гринокит  $CdS$ , серебро (Кулешевич и др., 2009; Кулешевич, Лавров, 2011; Лавров, Кулешевич, 2010). Селениды ассоциируют преимущественно с борнитом, выделяются самостоятельно и образуют мелкие включения и эмульсионную вкрапленность в краевых частях зерен борнита, что подчеркивает накопление Se в конце рудного процесса. Чаще встречаются клаусталит и науманнит (размером 2–10 мкм). Науманнит содержит примесь Te 0.81–2.39%, возникает изоморфный ряд с замещением Se на Te. Золото (размером 10–40 мкм) с содержанием Ag 16–20% и реже Cu до 1.09% установлено в борните, кварце и гематите в окисленной руде (фиг. 8а–б). В сростании с золотом встречаются науманнит, фишессерит  $AgAuSe_2$  (фиг. 8б–в), акантит, серебро, гессит. Более низкопробное тонкодисперсное золото ассоциирует с селенсодержащим борнитом. Оно содержит Ag до 32.9–74.06%, что позволяет отнести минерал к электруму или кюстелиту. В зоне окисления присутствуют халькозин, ковеллин, гематит, барит, малахит, азурит, куприт, встречается самородная медь.

Содержание элементов в рудах и околорудных метасоматитах составляет: Ti 0.06–3.1%, V 0.02–0.037, Cu 0.3–10.5 (среднее 1.3%), в г/т: Co 3–100,





**Фиг. 8.** Золото и срastание золота с селенидами в борнитовых рудах месторождения Воронов Бор: а – золото в гематите; б – золото (Au) и фишессерит (Fsh) в борните (Brn); в – срastание науманнита (Nau) и фишессерита (Fsh) в борните. Изображения в BSE.

Ni 18–107, Zn 13–462, Mo 1–21, Re 0.02–0.19, W 1–4.5, Pb 5–27, Te 0.5, Bi 0.2–73, Se 11–27, Ag 34–97, Au 0.26–1, Ba 288–1313, Y 11–63, U 1.3–185. Для измененных пород месторождения Воронов Бор с Au–Cu–S минерализацией получены Rb–Sr-изохроны с возрастом  $1778 \pm 6$  млн лет и  $1660 \pm 8$ – $1638 \pm 8$  млн лет (Глебовицкий и др., 2014).

*Месторождение Воицкое, Северо-Выгозерская структура.* Жильные и гнездовые Au–Cu-сульфидные руды (фиг. 9) месторождения представлены халькопиритом, борнитом, халькозином, золотом, в них встречаются молибденит, галенит, селеногаленит (Se до 9.7%), клаусталит PbSe, науманнит  $Ag_2Se$ , гессит  $Ag_2Te$ , штюцит  $Ag_5Te_3$ , виттихенит  $Cu_3BiS_3$ , богдановичит  $AgBiSe_2$ , фишессерит  $AuAg_3Se_2$ , самородный теллур (Se до 6.22), теннантит  $(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$ , барит (Кулешевич, Лавров, 2010, 2012). Золото образует несколько генераций и входит в состав селенида (табл. 7, анализы 1–2, 13). Более крупное высокопробное золото первой генерации (фиг. 9а–б) встречено в халькопирит-

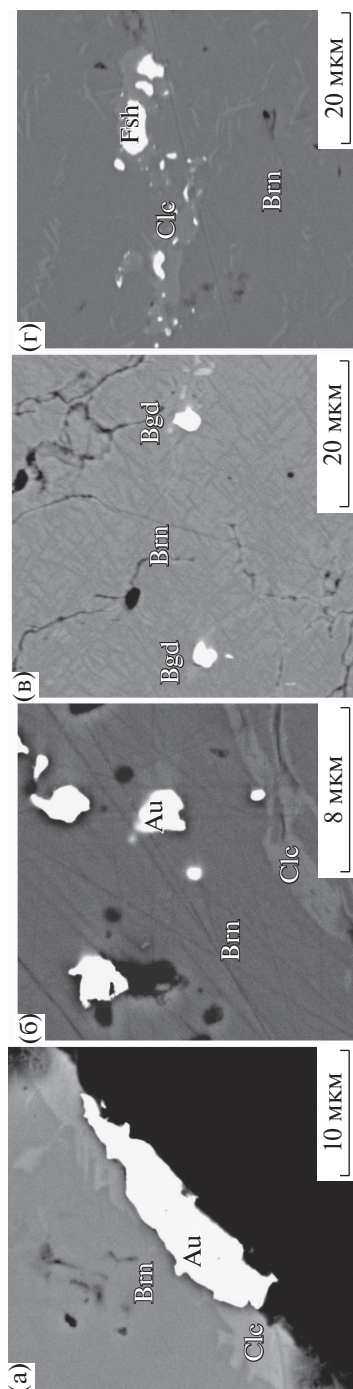
кварцевых жилах (Au 93.47–95.0%, Ag 6.53–5.0%), добывалось при разработке рудника (Кулешевич, Лавров, 2012). Тонкодисперсное золото второй генерации (Ag 11.75–21.71%), золотосодержащий науманнит и фишессерит  $AuAg_3Se_2$  были установлены в борнит-кварцевых жилах (фиг. 9в–г).

Селениды и теллуриды более распространены в борнит-кварцевых рудах (табл. 7). Борнит содержит пластинки халькопирита и решетку распада, представленную халькозином. В нем установлены мелкие тонкодисперсные овальные включения (3–50 мкм) науманнита, гессита, штюцита (табл. 7, анализы 6–8), а также промежуточные соединения зерен Au–Ag–Se–Te (анализы 9–12). В минералах этой группы намечается изоморфизм Ag с Au и Te с Se, содержание Au может достигать 2.16–12.35%, реже с ними встречается самородный теллур. В халькозине, ассоциирующем с науманнитом, увеличивается содержание Ag до 1.77%. В тонких срastаниях борнита с халькозином установлены Bi-содержащие минералы – богдановичит  $(Ag,Bi)Se_2$  и виттихенит –  $Cu_3BiS_3$  (табл. 7, анализы 35). Состав

**Таблица 7.** Типоморфная минеральная ассоциация месторождения Воицкого (мас. %)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Se	–	–	33.71	32.68	–	25.64	–	–	10.83	30.62	9.88	1.98	21.23
Ag	6.53	17.11	23.21	22.25	–	73.71	63.60	58.25	66.12	64.34	57.44	50.73	46.73
Te	–	–	–	–	–	0.46	36.23	41.55	23.05	5.04	32.68	41.25	1.34
Au	93.50	82.85	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6.02	30.70
Bi	–	–	43.07	46.83	41.48	–	–	–	–	–	–	–	–
S	–	–	–	–	20.21	–	–	–	–	–	–	–	–
Cu	–	–	–	–	39.31	–	–	–	–	–	–	–	–
Сумма	100.03	99.97	99.99	101.76	101	99.81	99.83	99.8	100	100	100	99.98	100

Примечание. 1 – золото-1 из кварцевой жилы, 2 – золото-2 из борнитовых руд, 3–4 – богдановичит  $AgBiSe_2$ , 5 – виттихенит  $Cu_3BiS_3$ , 6 – науманнит  $Ag_2Se$ , 7 – гессит  $Ag_2Te$ , 8 – штюцит  $Ag_{5-x}Te_3$ , 9 – Se-гессит, 10 – Te-науманнит, 11 – Se-штюцит, 12 – Au-Se-штюцит, 13 – фишессерит  $AuAg_3Se_2$ . Прочерк – элемент не обнаружен.



Фиг. 9. Золото и селениды в борнитовых рудах месторождения Воицкого: а – золото на границе борнита (Btm) с халькозином (Cic); б – золото в борните (Btm); в – болдановичит (Bgd) в борнитовых рудах, г – фишсерит (Fsh) в сростании с халькозином (Cic) в борните (Btm). Изображения в BSE.

халькозина позволяет оценить нижнюю температуру образования в 150–70°C (Кулешевич, Лавров, 2012).

В околожильных метасоматитах с редкой вкрапленностью пирита и халькопирита содержание Au колеблется от 0.006 до 0.2 г/т, Ag 0.001–0.046%, Ni 0.002–0.01%, Co до 0.001%. В халькопирит-кварцевых жильных рудах содержание Cu достигало 14.2%, (среднее 1.3%), Au до 13.2 г/т (Минерально-сырвая..., 2005). В более низкотемпературных борнитовых и борнит-халькозиновых рудах, детально изученных авторами, установлены повышенные концентрации (в г/т): Mo 218–320, Re 0.14, W 13.5, Se 20, Bi до 33, Ag 13.

*Рудопоявление Шуезерское, Лехтинская структура.* Основными рудными минералами жил и прожилков, секущих габброиды Шуезерской дайки, являются халькопирит, Co-пирит, галенит, молибденит, титанит, рутил, гематит. Прожилково-вкрапленная минерализация с преобладанием пирита содержит 0.32–0.95% Cu, Co 120 г/т, Ni 151 г/т. Медносульфидная (халькопиритовая) минерализация характеризуется содержанием Cu от 0.7 до 11.5–21.5% (среднее 2.43%), Ti 0.05–0.44%, а также (в г/т): Mo 25–260, Pb 37–2621, Ag 35–145, Zn 16–165, Bi 3–32, Te 0.6, Co 5–17, Ni 10–34, U 0.4–1.4, Se – в среднем 40 г/т. Содержание золота составляет 0.1–20 г/т, среднее содержание молибдена – 0.04% (Минерально-сырвая..., 2005). Более высокие концентрации золота тяготеют к измененным на контакте с габброидами метапесчаникам. В жилах с халькопиритом широкое распространение имеют минералы серебра – акантит  $Ag_2S$ , маккинстриит  $(Ag,Cu)_2S$ , штрмейерит  $CuAgS$ , серебро, низкопробное золото, электрум. Селениды в медно-сульфидных рудах Шуезерского проявления распространены меньше. Галенит, молибденит и висмутовые минералы встречаются в поздних прожилках. Установлено, что процессы изменения габброидов Шуезерской дайки происходили 1772 и ~1644 млн лет назад, что связывается с метаморфизмом и гидротермальной переработкой – альбитизацией и отложением рудной минерализации (возраст определен по циркону в ЦИИ ВСЕГЕИ).

*Рудопоявление Мойна в Елмозерско-Сегозерской структуре.* Околожильные метасоматиты развиваются по габброидам: они отличаются повышенным содержанием Ti, V, присутствием титаномагнетита, титанита, рутила и гематита. Пирит-халькопиритовая минерализация образует гнезда, вкрапленность, прожилки. Она сечется более поздними галенит-кварцевыми жилками, содержащими Cd-сфалерит, гринокит  $CdS$ , низкопробное золото (Ag 23.65–28.65%) и электрум (Ag 40.39–43.47%). Золото сростается с селенсодержащим галенитом (Se 2.62–7.17%) и замещается кюстелитом (Ag 60.52%, Au 39.48%). Селениды встречаются



ся редко, представлены науманнитом и клаусталитом. На галенит нарастает гринокит. В зоне окисления галенит замещается церусситом и англезитом. Содержание рудогенных элементов в пирит-халькопиритовых жилах (Cu более 2%) по данным ICP-MS анализа составляет (в г/т): Co 112–127, Ni 126–141, Zn 444–500. В секущих их галенит-кварцевых жилах установлено Cu 0.024–0.5%, Pb 0.5–2.9% и (в г/т): Cd 9–20, Bi 6–32, Ag 16, Te 1–3.6, Mo 1, U 3–5; Au 0.03–0.3. Содержание Se составляет 27–142 г/т.

На месторождении *Майское в Паана-Куоляярвинской структуре* ранняя рудная минерализация в пропилитах представлена пиритом и халькопиритом. В зальбандах кварцевых жил развита вкрапленность халькопирита, пирротина, Со-пентландита, сфалерита, галенита, кобальтина, а также встречаются более поздние минералы – клаусталит, галеноклаусталит Pb(S,Se), клокманнит CuSe, костибит CoSbS, цумоит BiTe, алтаит PbTe, гессит Ag<sub>2</sub>Te, гринокит CdS, вольнскит AgBiTe<sub>2</sub>, раклиджит PbBi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>, поубаит PbBi<sub>2</sub>(Se,Te,S)<sub>4</sub>, минералы ряда кавацулит-скиппенит Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se (Порицкий и др., 1993; Сафонов и др., 2003; Вольфсон и др., 2005; Калинин и др., 2018). Золото отлагалось в две стадии. Более крупное золото-1 (размером 0.1–2 мм) содержит 6–10% Ag; мелкое золото-2 (до 10 мкм) ассоциирует с Ag-содержащими минералами и содержит 20–43% Ag.

На *рудопроявлении Кайралы* рудная минерализация кварцевых жил представлена пиритом, халькопиритом, встречаются пирротин с пламенеvidным пентландитом, сфалерит, кобальтин, миллерит, мелонит, калаверит, монтбрейит, клаусталит, золото и электрум (Войтеховский и др., 2009, 2010; Чернявский и др., 2012). Золото ассоциирует с теллуридами и селенидами.

По результатам Rb–Sr датирования для месторождения *Майское* установлено, что пропилиты формировались от 1.85–1.77 млрд лет, магнезиальные метасоматиты (кварц-биотит-амфиболовые ассоциации) ~1.66 млрд лет, а околорудные гумбеиты ~1.403 млрд лет (Сафонов и др., 2003; Коваль и др., 2019). Золото отлагалось на стадии образования гумбеитов. С золотом ассоциирует галенит с примитивным изотопным составом и модельным возрастом 2530 млн лет: объясняется это ремобилизацией рудного вещества из архейских пород в период Свекофеннской орогении (Турченко, Гроховский, 2018). Отмечается также влияние палеозойских процессов (Бушмин и др., 2013).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Лапландско-Онежская региональная структура заложилась и развивалась в палео- и мезопротерозое как рифтогенная. В карельской части она представлена вытянутыми локальными

синклинорными структурами, выполненными палеопротерозойскими комплексами пород, среди которых преобладают толщи ятулийского и людииковийского надгоризонтов, сформировавшиеся 2.3–1.92 млрд лет назад. Со свекофенским орогенным этапом развития Лапландско-Онежской структуры, проявившимся на Карельском кратоне около 1.78 млрд лет, связываются главные складчато-разрывные деформации, метаморфические преобразования и последующие (около 1.6 и 1.5–1.4 млрд лет) метасоматические изменения пород, сопровождающиеся благороднометалльно-Cu–U, благороднометалльно-Cu–U–V и Au–Cu-сульфидной минерализацией (Глебовицкий и др., 2014). Фиксируется влияние и более поздних мезопротерозойских (с возрастом 1.2–1.1 млрд лет) и палеозойских процессов.

Локализация благороднометалльно-Cu–U, благороднометалльно-Cu–U–V и Au–Cu-сульфидных месторождений и рудопроявлений как в Финляндии, так и Карелии, имеет отчетливо выраженный структурно-тектонический контроль (Patisson, 2007; Hitzman, 1992; Калинин, 2018; Минерально-сырьевая..., 2005; Онежская..., 2012). В палеопротерозойских структурах Карелии рудная минерализация отлагалась в зонах складчато-разрывных или сдвиговых деформаций северо-западных или северо-восточных простираний. Деформации вмещающих комплексов сопровождались метаморфизмом пород, дорудными пропилитами, последующими низкотемпературными изменениями (на разных стадиях процесса имеющими разную щелочность-кислотность – эйситами, щелочно-железо-магнезиальными метасоматитами, гумбеитами, слюдитами, березитами) и кварц-карбонатными жилами. Значительный вклад в формирование этих гидротермально-метасоматических систем внесли высокосолёные захороненные растворы палеопротерозойских бассейнов. Температура образования дорудных и околорудных метасоматитов не превышала 300–400°C, оруденения – 300–50°C, а глубина формирования – 0.5–2.5 км.

В Онежской структуре метасоматоз проявился наиболее широко. Отложение комплексного благороднометалльно-Cu–U–V оруденения (с Mo, Bi, Se) происходило в Cr–V-слюдитах полистадийно, о чем свидетельствуют геологические наблюдения и имеющиеся датировки пород и руд. Щелочные метасоматиты сопровождаются урановой минерализацией и интенсивной гематитизацией пород, в связи с их близповерхностным формированием. Отложение благородных металлов (золота и Pd–Bi–Se-фаз) происходило на заключительных стадиях процесса, а молибденита, судя по Re/Os датировкам, несколько позднее. Присутствие селена практически во всех типах рудной минерализации, приуроченность селенидов к участкам с наиболее низкотемпературными медными сульфидами и максимальная связь с

урановой минерализацией подчеркивают возможность привноса этого элемента.

Комплексные руды Онежской структуры и рудная минерализация Кумсинской, Лехтинской, Пана-Куолаярвинской и других структур Карелии подобны Au–Cu–S и Au–U месторождениям и проявлениям Северной Финляндии, относимых к группам 1 и 2, по систематике финских геологов, а именно: 1 – золото-сульфидным (или сульфо-арсенидным) гидротермальным объектам орогенической группы; 2 – золото-медно-сульфидным с атипичной геохимической ассоциацией (Cu, Au, Ni, Co, Mo, Bi, Te, As, Se, U, P3Э). Установленные геохимические ассоциации руд имеют контрастные свойства. U и Au, Co–Ni и Mo–Bi–Pb – это элементы с резко различающимися геохимическими свойствами, генезисом, а их ассоциации, соответственно, относятся к “атипичным”. Тем не менее, как показывают исследования на различных месторождениях мира, случаи совместных концентраций этих элементов в комплексных объектах оказались весьма значительны и практически значимы (Roberts, Hudson, 1983; Johnson, Cross, 1995; Reynolds, 2000; Eilu, 1999; Eilu, Niiranen, 2002; Patison et al., 2007). Среди мезозойских Au–U-месторождений, например, к таким объектам в России относится уникальный Эльконский золото-урановый рудный узел (Мигута, 1997; Молчанов и др., 2012). В Северной Финляндии – палеопротерозойское месторождение Ромпас (Vanhanen et al., 2015; Полеховский и др., 2019), где благородные металлы и уран встречаются совместно или в пространственной близости. Очевидно, отсутствие As в протерозойских рудных объектах Карелии объясняется их более низкотемпературным образованием. В близповерхностных условиях начинают доминировать кислородные соединения (гематит, гетит, минералы урана, барит, низкотемпературные генерации минералов группы кварца – аметисты, карнеолы). Уникальным примером комплексного рудного сырья (Cu, Fe, U, Au, P3Э) и опалов является рифейское месторождение Олимпик Дэм в Австралии и другие подобные объекты на большой площади его проявления. В связи с таким подобием геохимических данных и полученными датировками (1.67–1.49 млрд лет) авторами статьи высказывались предположения о возможном открытии подобного рудного объекта в Онежской структуре.

В пределах Лапландско-Онежской структуры можно наметить региональную зональность размещения благороднометалльно-Cu–U – благороднометалльно-Cu–U–V и Au–Cu-сульфидных месторождений или рудопроявлений, зависящую от геологического положения и строения конкретных геологических структур (фиг. 1). Наиболее значительные рудные объекты установлены в Онежской структуре. Руды месторождений так называемого Падминского типа – источник ва-

надия и урана (табл. 1), подготовленный благодаря производственным работам для освоения, с ними попутно могут добываться благородные металлы (Минерально-сырьевая..., 2005).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(1) Со свекофеннским орогенным этапом развития Лапландско-Онежской рифтогенной структуры, проявившимся на Карельском кратоне около 1.78 млрд лет назад, связываются главные складчато-разрывные деформации. Деформация вмещающих палеопротерозойских комплексов сопровождалась метаморфизмом пород, образованием дорудных и синрудных метасоматитов и кварц-карбонатных жил с благороднометалльной рудной минерализацией. Длительность формирования метасоматитов и оруденения на рудопроявлениях и месторождениях Карелии, установленная различными методами, укладывается преимущественно в интервал ~1.78–1.49 млрд лет.

(2) Интенсивные щелочные изменения разных по составу вмещающих пород ятулийского и людиновского надгоризонтов (ультраосновных, основных, карбонатных, шунгитоносных, алевролитов, габбродолеритов) способствовали выносу широкого спектра элементов, переотложению их в зонах слюдитов и карбонатно-слюдистых метасоматитов и завершились дополнительным привносом гранитофильных элементов. Метасоматические изменения пород сопровождалось отложением благороднометалльно-медно-уранового, благороднометалльно-медно-уран-ванадиевого, золото-медно-сульфидного оруденения и молибденитовой минерализации.

(3) Руды содержат большой и разнообразный (“атипичный”) набор элементов: U, V, Cu, Au, Ag, Pd, Pt, Mo, Zn, Pb, Se, S, Bi, Te, переменные концентрации Fe, Ti, Cr, Co, Ni, Cd, Re, Ba, Y, P. Среди этих элементов V, U, Cu, благородные металлы и иногда Mo формируют промышленные концентрации.

(4) К типоморфным элементам благороднометалльно-Cu–U, благороднометалльно-Cu–U–V и Au–Cu-сульфидных месторождений и проявлений Карелии относится селен. Геохимический анализ комплексов пород, распространенных в изученных структурах, показал крайне низкий фон этого элемента во всех типах вмещающих пород, кроме шунгитоносных толщ Онежской структуры, где фиксируются средние содержания селена 3–13 г/т. В метасоматитах по шунгитам с сульфидами содержание Se увеличивается в десятки раз. В метасоматитах с вкрапленно-прожилковой минерализацией падминского типа его концентрация возрастает до 40–1600 г/т и достигает нескольких процентов в участках развития клаусталитовых прожилков.

(5) Благороднометалльная гидротермальная минерализация тяготеет к участкам с селенидами, которые относятся к типоморфным минералам. Среди них наиболее распространенными являются клаусталит и науманнит. Установлены более редкие минералы — фишессерит, палладсеит, падмаит, судовиковит, богдановичит, парагуанахуатит, эвкайрит, умангит, клоксманнит, тиманнит, тиррелит, кадмоселит, а также селенсодержащие сульфиды (Se-молибденит, Se-малышевит, вейбуллит, селеногаленит, Se-борнит и халькозин) и селенотеллуриды (кавацулит, скиппенит, поубаит, бамболлаит). В зонах окисления в ассоциации с гематитом, гетитом встречаются самородный селен, селенаты и необычные глобулярные сростания золота с палладсеитом.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполняется по теме НИР № 209 ИГ КарНЦ РАН, № ГР: АААА-А18-118020290084-7.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдонин В.В., Бойцов В.Е., Григорьев В.М. и др.* Месторождения металлических полезных ископаемых. М.: Академический проект, Трикста, 2005. 720 с.
- Афанасьева Е.Н., Миронов Ю.Б.* Комплексное золото-урановое оруденение восточной части Балтийского щита // Золото Фенноскандинавского щита: Матер. межд. конф. КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2013. С. 9–12.
- Билибина Т.В., Мельников Е.К., Савицкий А.В.* О новом типе месторождений комплексных руд в Южной Карелии // Геология руд. месторождений. 1991. № 6. С. 3–14.
- Бороздин А.П., Полеховский Ю.С., Бушмин С.А. и др.* Возраст рудообразующих метасоматических процессов на месторождении ванадия, благородных металлов и урана Средняя Падма (Карелия, Балтийский щит) // ДАН. 2014. Т. 454. № 3. С. 310–314.
- Бушмин С.А., Беляцкий Б.В., Крымский Р.Ш. и др.* Изотопный Rb–Sr-возраст жильного золото-кварцевого месторождения Майское (Северная Карелия, Балтийский щит) // ДАН. 2013. Т. 448. № 1. С. 76–79. <https://doi.org/10.7868/S0869565214030177>
- Войтеховский Ю.Л., Чернявский А.В., Басалаев А.А. Савченко Е.А.* Золото участка Кайралы // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. № 6. 2009. С. 105–108.
- Войтеховский Ю.Л., Чернявский А.В., Басалаев А.А. Савченко Е.А.* Золото рудопроявления Кайралы // Зап. РМО. Ч. 139. Вып. 4. 2010. С. 75–79.
- Вольфсон А.А., Рушинов В.Л., Крылова Т.Л. и др.* Метасоматические преобразования докембрийских метабазитов Салла-Куоляярвинского грабена в районе золоторудного поля Майское, Северная Карелия // Петрология. 2005. Т. 18. № 2. С. 179–206.
- Глебовицкий В.А., Бушмин С.А., Богомоллов Е.С. и др.* Rb–Sr-возраст метасоматоза и рудообразования в низкотемпературных зонах сдвиговых деформаций Фенно-Карельского кратона (Балтийский щит) // ДАН. 2012. Т. 445. № 1. С. 61–65.
- Глебовицкий В.А., Бушмин С.А., Беляцкий Б.В. и др.* Rb–Sr возраст метасоматоза и рудообразования в низкотемпературных зонах сдвиговых деформаций Фенно-Карельского кратона, Балтийский щит // Петрология. 2014. Т. 22. № 2. С. 208–232.
- Калинин А.А.* Золотоносная молибден-урановая минерализация Салла-Пана-Куоляярвинской зоны // Труды X Ферсмановской научной сессии. Апатиты, 2013. С. 142–147.
- Калинин А.А.* Золото в метаморфических комплексах северо-восточной части Фенноскандинавского щита. Апатиты, 2018. 250 с.
- Калинин А.А., Савченко Е.А., Селиванова Е.А.* Рений- и селенсодержащий молибденит рудопроявления Озерное в Салла-Куоляярвинской зоне, Северная Карелия // Зап. РМО. 2013. № 6. С. 105–115.
- Калинин А.А., Савченко Е.А., Селиванова Е.А.* Минерализация Se и Te в альбититах и перспективы золотоносности метасоматитов Салла-Куоляярвинской зоны, Северная Карелия // ДАН. 2014. Т. 455. С. 58–61.
- Калинин А.А., Каулина Т.В., Лялина Л.М., Елизаров Д.В., Серов П.А.* Этапы формирования урановой минерализации Салла-Куоляярвинской зоны (Северная Карелия): геологические и изотопно-геохронологические данные // Зап. РМО. 2015. № 2. С. 99–108.
- Калинин А.А., Карпов С.М., Калачева А.Б. и др.* Новые данные по минералогии золотокварцевого месторождения Майского (Северная Карелия) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, 2018. Т. 15. С. 172–175. <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.042>
- Коваль А.В., Богачев В.А., Петров С.В.* Особенности рудной минерализации золотоурановых рудопроявлений Озерное и Лагерное Куоляярвинской структуры (Северная Карелия) // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22. № 1. С. 23–35. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-23-35>
- Колядина Н.И.* Урановая минерализация в эйситах рудопроявлений Лагерное и Озерное (Северная Карелия) // Изв. Сибирского отделения. Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. Т. 40. № 1. 2017. С. 83–96.
- Кулешевич Л.В., Голубев А.И.* Благородные металлы в щелочных метасоматитах Средней Падмы, Карелия // Руды и металлы. 2012. С. № 1. С. 17–25.
- Кулешевич Л.В., Лавров О.Б.* Рудник Воицкий – Au–Cu–S-кварцевое месторождение в Северо-Выгозерской палеопротерозойской структуре Карелии // Полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2010. Вып. 13. С. 116–130.
- Кулешевич Л.В., Лавров О.Б.* Золотосодержащие медные руды участка Воронов Бор в палеопротерозойских отложениях Карелии // Зап. РМО. 2011. Ч. 140. Вып. 2. С. 74–84.
- Кулешевич Л.В., Лавров О.Б.* История открытия и минералогия Воицкого рудника (Карелия) // Зап. РМО. № 5. 2012. С. 59–67.

- Кулешевич Л.В., Лавров О.Б. Au–Pd–Cu–Se–U-рудная минерализация проявления Светлое в Центральной Карелии // Руды и металлы. 2020. № 1. С. 69–86.
- Кулешевич Л.В., Голубев А.И., Лавров О.Б. Палеопротерозойские золотосодержащие медные месторождения и проявления Карельского кратона // ДАН. Т. 432. № 3. 2010. С. 376–380.
- Кулешевич Л.В., Лавров О.Б., Голубев А.И. Золотосодержащее медносульфидное месторождение Воронов Бор и перспективы медносульфидных проявлений Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2009. Вып. 9. С. 26–47.
- Кулешевич Л.В., Лавров О.Б., Дмитриева А.В. Геологическое строение и Cu–Pb–Au–Pd–Se–U минерализация Кумсинской структуры // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2011. Вып. 14. С. 127–145.
- Кулешевич Л.В., Филиппов М.М., Гольцин Н.А. и др. Метасоматиты по шунгитосносным породам Макковского месторождения (Онежская структура, Карелия) // Литология и полезные ископаемые. 2019. С. 149–164. <https://doi.org/10.31857/S0024-497X20192149-164>
- Лавров О.Б., Кулешевич Л.В. Первые находки рениевых минералов в Карелии // ДАН. 2010. Т. 432. № 1. С. 94–98.
- Лавров О.Б., Кулешевич Л.В. Минеральные ассоциации низкотемпературных жил и зон окисления проявления Кондобережская (Онежская структура, Карелия) // Труды 17 Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, 2020. С. 317–321. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.060>.
- Леденева Н.В., Пакульнис Г.В. Минералогия и условия образования уран-ванадиевых месторождений Онежской впадины (Россия) // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 3. С. 258–268.
- Мельников Е.К., Шумилин М.В. О возможной модели образования уран-ванадиевых с благородными металлами месторождений в Онежском районе (Карелия) // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1995. № 6. С. 31–37.
- Мельников Е.К., Петров Ю.В., Рябухин В.Т., Савицкий А.В. Онежский рудный район с уран-золото-платино-металло-ванадиевыми месторождениями // Разведка и охрана недр. 1992. № 8. С. 31–36.
- Металлогения Карелии / Под ред. Рыбаков С.И., Голубев А.И. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 340 с.
- Микута А.К. Состав и парагенетические минеральные ассоциации урановых руд Эльконского рудного района (Алданский щит, Россия) // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 38. № 4. С. 323–343.
- Минерально-сырьевая база Республики Карелия / Под ред. Михайлов В.П., Аминов В.Н. Петрозаводск: “Карелия”, 2005. Кн. 1. 278 с.
- Молчанов А.В., Шатов В.В., Терехов А.В. и др. Эльконский золото-урановорудный узел (Южная Якутия) – основные черты геологического строения, петрографо-геохимические особенности гидротермально-метасоматических образований и рудоносность // Региональная геология и металлогения. 2012. № 50. С. 80–101.
- Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Под ред. Глушанин Л.В., Шаров Н.В., Щипцов В.В. Петрозаводск, 2011. 432 с.
- Полеховский Ю.С., Волошин А.В. Новые природные системы платиноидов в метасоматитах Южной Карелии // ДАН. 1990. Т. 315. № 3. С. 700–703.
- Полеховский Ю.С., Волошин А.В., Тарасова И.П. и др. Новый тип палладийсодержащей минерализации в метасоматитах Карелии // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1991<sub>1</sub>. № 7. С. 86–95.
- Полеховский Ю.С., Волошин А.В., Тарасова И.П. и др. Падмаит PdBiSe – новый селенид палладия и висмута из метасоматитов южной Карелии // Зап. ВМО. 1991<sub>2</sub>. 125. № 3. С. 85–88.
- Полеховский Ю.С., Петров С.В., Калинин А.А. и др. Новые данные о минералогии золото-уранового рудопроявления Ромпас, Финляндия // Труды 16 Ферсман. научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, 2019. С. 482–486.
- Полеховский Ю.С., Тарасова И.П., Нестеров А.Р. и др. Судовиковит PtSe<sub>2</sub> – новый селенид платины из метасоматитов Южной Карелии // ДАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 82–85.
- Порицкий М.С., Буйко А.К., Котов Н.В., Порицкая Л.Г. Геологическая позиция и условия формирования золоторудных метасоматитов месторождения Майское (Северная Карелия) // Вестник Санкт-Петербургского университета. 1993. Сер. 7. Вып. 1. С. 15–21.
- Сафонов Ю.Г., Волков А.В., Вольфсон А.А. и др. Золото-кварцевое месторождение Майское (Северная Карелия): геологические и минералого-геохимические особенности, вопросы генезиса // Геология руд. месторождений. 2003. Т. 45. № 5. С. 429–451.
- Соловьев С.Г. Железооксидно-золото-медные и родственные месторождения. М.: Научный мир, 2011. 469 с.
- Турченко С.И., Гроховский Б.М. Полигенная природа золоторудного месторождения Майское (Северная Карелия): геологические и изотопные свидетельства // Региональная геология. 2018. № 74. С. 43–48.
- Черников А.А., Чистякова Н.И., Уваркина О.М. и др. Малышевит PdBiCuS<sub>3</sub> – новый минерал из месторождения Средняя Падма в Южной Карелии // Новые данные о минералах. 2006. Вып. 41. С. 14–17.
- Чернявский А.В., Волошин А.В., Войтеховский Ю.Л. Благороднометаллическая и сульфидная минерализация в малосульфидных эпитегральных рудопроявлениях Пана-Куоляярвинской структуры // Труды КарНЦ РАН 2012. № 3. С. 157–164.
- Barton M.D., Johnson D.A. Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization // Geology. 24. 1996. P. 259–262. [https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB\\_papers\\_pdf/Barton96\\_IOC-G\\_GEOL.pdf](https://www.geo.arizona.edu/~mdbarton/MDB_papers_pdf/Barton96_IOC-G_GEOL.pdf).
- Gold in the Central Lapland Greenstone Belt. Geological Survey of Finland / Ojala V. Juhani (Ed.) Special Paper 44. Espoo, 2007. 267 p.
- Goltsin N.A., Saltykova A.K., Polekhovskiy Yu.S. et al. Zircons from high carbon palaeoproterozoic sediments (shungites) of the Onega structure (Central Karelia, NW Russia) // 4-th International Shrimp Workshop. Abstract. S-Pet., 2008. P. 50–53.
- Eilu P. FINGOLD – a public database on gold deposits in Finland // Geological Survey of Finland. Report of Investigation 146. 1999. 224 p.
- Eilu P., Niiranen T. Iron oxide-copper-gold deposits in Finland // GSF. Espoo, 2002. <http://en.gtk.fi/export/sites/>

en/information/services/commodities/images/iocg\_in\_finland.pdf.

*Eilu P., Pankka H., Keinänen V., Kortelainen V., Niiranen T., Pulkkinen E.* Characteristics of gold mineralisation in the greenstone belts of northern Finland // Geological Survey of Finland. 2007. Special Paper 44. P. 57–106.

*Frietsch R., Frietsch R., Tuisku P., Martinsson O.* Early Proterozoic Cu–(Au) and Fe ore deposits associated with regional Na–Cl metasomatism in northern Fennoscandia // Ore Geol. Rev. 12. 1997. P. 1–34.

*Hitzman M.W., Oreskes N., Einaudi M.T.* Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu–U–Au–REE) deposits // Precamb. Res. 1992. V. 58. P. 241–287.

*Johnson J.P., Cross K.C.* U–Pb geochronological constraints on genesis of the Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, South Australia // Econ. Geol. 1995. V. 90. P. 1046–1063.

*Korkalo Tuomo.* Gold and copper deposits in Central Lapland, Northern Finland, with special reference to their exploration and exploitation // Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, P.O. Box 3000, FI-90014. University of Oulu, Finland. Acta Univ. Oul. A 461. 2006. 126 p.

*Niiranen Tero.* Excursion locality 2 Hannukainen. In Eilu, P. (ed.) Iron oxide-copper-gold excursion and workshop to Northern Finland and Sweden // Geological Survey of Finland. 2004. 31.5.–4.6. P. 42–57. Report M10.3/2004/1/10.

*Niiranen Tero.* Iron Oxide-Copper-Gold Deposits in Finland: case studies from the Peräpohja schist belt and the

Central Lapland greenstone belt: Academic dissertation. Publications of the Department of Geology. University of Helsinki, 2005.

*Patison N.L.* Structural Controls on Gold Mineralisation in the Central Lapland Greenstone Belt // Geological Survey of Finland. Special Paper 44. 2007. 107–124.

*Patison N.L., G. Salamis & V. J. Kortelainen.* The Suurikuusikko gold deposit: project development summary of northern Europe's largest gold resource gold in the Central Lapland Greenstone Belt, Finland // Geological Survey of Finland. Special Paper 44. 2007. P. 125–134.

*Reynolds L.J.* Geology of the Olympic Dam Cu–U–Au–Ag–REE Deposit // In Porter T.M. (Ed.) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. PGC Publishing, Adelaide. 2000. V. 1. P. 93–104.

*Roberts D.E. and Hudson G.R.T.* The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia // Econ. Geol. 1983. V. 78. № 5. P. 799–822.

*Vanhanen E.* Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe–Co–Au–(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland // Geological Survey of Finland. 2001. Bulletin 399. 229 p.

*Vanhanen E., Cook N.D.J., Oliver N.H.S et al.* The Rompas Prospect, Peräpohja Schist Belt, Northern Finland // Mineral Deposits of Finland. 2015. Chapter 5.4. P. 467–484.

*Wyche N.L., P. Eilu, J. Välimaa.* The Suurikuusikko Gold Deposit (Kittilä Mine), Northern Finland // Mineral Deposits of Finland. 2015. Chapter 5.2. P. 411–433.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00016-9>.