

Два этапа золотосульфидной минерализации в раннепротерозойских габброидах Северного Приладожья*

Ш. К. Балтыбаев^{1,2}, Г. В. Овчинникова¹, А. Б. Кузнецов^{1,2}, И. М. Васильева¹,
Н. Г. Ризванова¹, И. А. Алексеев², П. А. Кириллова¹

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Балтыбаев, Ш. К., Овчинникова, Г. В., Кузнецов, А. Б., Васильева, И. М., Ризванова, Н. Г., Алексеев, И. А., Кириллова, П. А. (2021). Два этапа золотосульфидной минерализации в раннепротерозойских габброидах Северного Приладожья. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (3), 559–577. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.307>

Изучение изотопов Рb полевых шпатов и сульфидов показало, что формирование золотосодержащего сульфидного оруденения в раннепротерозойских габброидах Северного Приладожья связано с разными тектоническими этапами. Такой вывод сделан на основе сравнительного анализа изотопных составов свинца полевых шпатов и сульфидов из раннепротерозойских интрузивных массивов Велимяки и Алатту-Пякюля. Изученные раннеорогенные интрузии имеют одинаковый возраст, занимают сходную геологическую позицию, находясь в зоне сочленения Свекофеннского аккреционного комплекса и Карельского кратона. Для обоих массивов характерна благороднометалльная сульфидная минерализация, связанная с зонами локальных сдвиговых деформаций. Формирование исследованных руд массивов отнесено к свекофеннскому и каледонскому этапам тектогенеза. Полевые шпаты габброидов Велимяки имеют модельный Рb-возраст заметно древнее U-Рb-возраста циркона (1.9 млрд лет), что отвечает свекофеннскому времени магматической кристаллизации габбро и клинопироксенитов массива. А сульфидная пирит-пирротиновая минерализация с золотом в этих габброидах связана с каледонским этапом флюидно-термальной переработки раннепротерозойских магматических минеральных парагенезисов. Полевые шпаты и сульфиды массива Алатту-Пякюля имеют сходные между собой свинцовые изотопные параметры и модельный Рb-возраст (~2 млрд лет), что несколько древнее U-Рb-возраста циркона. Формирование породообразующих и рудных сульфидных ассоциаций с золотом массива Алатту-Пякюля происходило во время свекофеннских (раннепротерозойских) плутонических и тектоно-термальных событий. Источник свинца сульфидов массива Велимяки характеризуется параметрами верхней коры с высоким значением $\mu_2 = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$, в то время как у минералов массива Алатту-Пякюля параметр μ_2 несколько ниже, что указывает на участие в образовании магмы вещества мантийно-нижнекорового резервуара.

Ключевые слова: изотопный состав свинца, габброиды, Северное Приладожье, сульфиды.

* Работа выполнена за счет финансирования темы НИР Института геологии и геохронологии докембрия РАН (№ FMUW-2019-0003) Минобрнауки России.

1. Введение и постановка проблемы

Раннепротерозойские габброиды Северного Приладожья приурочены к зоне сочленения пород Свекофеннского пояса и архейского Карельского кратона (Шаров, 2020). Повышенное внимание исследователей к приладожским габброидам вызвано находками благороднометалльной минерализации во вкрапленно-прожилковых сульфидных рудах, развитых в зонах локальных сдвиговых деформаций и флюидной активности (Иващенко и др., 2002; Алексеев и др., 2005). Ранее нами были изучены Pb-изотопные системы полевых шпатов, пирита и пирротина из габброидов и руд раннепротерозойского массива Велимяки Северного Приладожья (Балтыбаев и др., 2017) и установлено, что сульфиды имеют радиогенный изотопный состав Pb, появление которого было связано с тектоно-термальными событиями каледонского этапа. Выявлено, что модельный Pb-возраст сульфидов близок к изохронному при условии, что изотопный состав Pb эволюционировал из геохимического резервуара с возрастом 1.9 млрд лет. Таким образом, следовало, что изотопный состав свинца полевого шпата отвечает протерозойскому времени (2.1–1.9 млрд лет) магматической кристаллизации пород массива, тогда как аномально радиогенный рудный свинец сульфидов из золотосодержащих жил метасоматитов массива фиксирует каледонский этап минералообразования. В соответствии с этим возник вопрос о масштабах рудной минерализации каледонского этапа в Северном Приладожье. В данной работе рассмотрены изотопные системы Pb золотосодержащих сульфидных руд и полевых шпатов пород, содержащих оруденение, из массива Алатту-Пякюля, занимающего сходную геологическую позицию с изученным ранее массивом Велимяки и практически одновозрастного с ним.

2. Магматизм Северного Приладожья и краткая характеристика изученных массивов

В Северном Приладожье в зоне сочленения структур протерозойского Свекофеннского пояса и архейского Карельского кратона найдено более двух десятков интрузий габброидов раннепротерозойского возраста, которые рассматриваются в составе двух раннеорогенных комплексов — кааламского и велимякского (Шаров, 2020). Геологической характеристике массивов региона и их рудоносности посвящен ряд работ: (Алексеев и др., 2005; Алексеев, 2008; Алексеев и Котова, 2010; Алексеев и Кулешевич, 2017; Богачёв и др., 1999; 2013; Балтыбаев и др., 2017; Иващенко и др., 2002; 2008; Иващенко и Голубев, 2011; Кратц, 1976; Лавров и Кулешевич, 2016; Шаров, 2020; Саранчина, 1948; 1949; Светов и др., 1990).

Подавляющая часть магматических образований Северного Приладожья связана со свекофеннской тектоно-термальной активностью региона и постсвекофенским рифтингом кратонизированной территории (Шаров, 2020). По отношению к стадиям свекофеннского орогенеза мантийно-коровый магматизм делят на ранне-, син-, поздне- и посторогенный. Отдельной вехой выделяется рифтогенный режим, во время которого были сформированы анорогенные комплексы гранитов рапакиви. Завершение эндогенной активности региона ознаменовано образованием субиотнийских базитовых комплексов (Шаров, 2020).

Все интрузии внедрились в супракрустальные толщи, представленные в регионе двумя сериями: метаморфизованной преимущественно вулканогенной — сортавальской; и метаморфизованной преимущественно осадочной — ладожской. Возрастной диапазон формирования вулканогенно-осадочного комплекса составляет от 1.97–1.96 до 1.89 млрд лет (Шаров, 2020).

На территории Северного Приладожья к раннеорогенным (1.90–1.87 млрд лет) относятся три габброидных комплекса: два в т. н. Северном домене (Балтыбаев и др., 2009) — кааламский клинопироксенит-габбронорит-диоритовый и повышенной щелочности велимякский клинопироксенит-габбро-(монцо)-диоритовый, и один в Южном домене (Балтыбаев и др., 2009) — куркиекский норит-эндербитовый.

Среди интрузий син- и позднеорогенного этапа (1.88–1.85 млрд лет) выделяют два типа известково-щелочных ассоциаций и, соответственно, комплексов: низко-умереннокалиевый лауватсарско-импиниемский габбро-диорит-тоналитовый и высококалиевый кузнеченский порфириовидно-гранитный. К позднеорогенному этапу относятся породы лавиярвинского метадиорит-трондьемитового и тервуского метадиорит-гранитного комплексов (Балтыбаев и др., 2000).

С посторогенным магматизмом (около 1.80 млрд лет) в Северном Приладожье связано несколько комплексов с широкими вариациями составов пород (гранитоиды, мафиты, апатитоносные ультрамафиты), наиболее распространенными из которых являются шошонитовый элисенваарско-вуоксинский и пегматит-лейкогранитовый маткаселькский (Шаров, 2020).

К внутриплитному магматизму (1.65–1.53 млрд лет) в Северном Приладожье приурочено образование анортозит-рапакивигранитной ассоциации. В изученном регионе находятся два крупнейших плутона гранитов рапакиви: Салминский и Выборгский. На о. Гогланд в Финском заливе с Выборгским массивом ассоциируют комагматичные вулканы хогландской толщи, в которой бимодальные вулканические серии соответствуют возрасту батолита 1638 ± 4 млн лет (Шаров, 2020). Салминский батолит перекрывается терригенно-вулканогенной толщей иотния и прорывается дайками основных пород, комагматичных интрузивному телу салминских гранитов.

Завершают стадии магматической активности в регионе иотнийский и пост-иотнийский магматизм (~1.46 млрд лет и моложе). Породы этого этапа представлены интрузивными телами вааламского комплекса, сложенными феррогаббро, габбродолеритами и монцонитоидами, а также базальтовыми лавами приозерской, трахибазальтами салминской и пашской свит (Шаров, 2020).

Кааламский клинопироксенит-габбронорит-диоритовый комплекс включает одноименный крупный (~80 км²) массив и ряд более мелких (Араминлампи, Ихаланваара, Сурисуо, Кеккоселька, Винаоя, Кархонланмяки и др.) площадью до нескольких квадратных километров. В состав комплекса входят также гипабиссальные габбродиорит-тоналитовые интрузии участка Алатту-Пякюля (рис. 1).

Для диоритов, тоналитов и гранодиоритов интрузии Алатту-Пякюля, относящейся к кааламскому комплексу, характерны массивные, местами гнейсовидные текстуры, средне- и крупнозернистые структуры. Минеральный состав представлен плагиоклазом (50–80 %), кварцем (5–35 %), биотитом (3–20 %), изредка амфиболом. В основном структура пород гипидиоморфнозернистая (Богачёв и др., 2013),

но встречается и порфи́ровая структура с плагиоклазовыми вкрапленниками, реже кварцевыми, иногда биотитовыми. Характерны крупные скопления биотита и хлорита, иногда с реликтами амфибола. Среди акцессорных минералов преобладают сульфиды (пирит, арсенопирит, халькопирит, молибденит, пирротин, сфалерит, галенит), титанит, апатит, ксеногенный циркон, встречаются также магнетит, ильменит, эпидот, турмалин, барит (Иващенко и др., 2002).

Велимякский комплекс раннеорогенных габброидов включает в себя массив Велимяки (рис. 1), в пределах которого еще в XIX в. производилась эксплуатация месторождений титаномагнетитовых руд, а также небольшие тела габбро и габбро-диоритов, монцогаббро, монцодиоритов, встречающиеся спорадически западнее массива Велимяки.

В Велимякском массиве по петрографическим особенностям выделяются три разновидности пород: пироксениты, габбро и диориты.

Пироксениты представлены крупными телами линзовидной и овальной формы, также встречаются в виде шпировидных, жилородных разновидностей. В зависимости от содержания порообразующих и второстепенных минералов выделяются: плагиоклазосодержащие, биотитовые, роговообманковые и рудные магнетитовые пироксениты. Минеральный состав: клинопироксен (35–95%), амфибол (7–20%), биотит (10–20%), присутствуют апатит, титанит, плагиоклаз (до 1–2%). Клинопироксен представлен идиоморфными зернами диопсида, размером до 3 мм. Амфиболы образуют непрерывный ряд от паргасита до тремолит-актинолита через магнезиальную роговую обманку. Зерна паргасита и магнезиальной роговой обманки гипидиоморфные, размером 1–5 мм, плеохроируют в буро-зеленых цветах, часто в сростаниях с пироксеном, иногда заполняя межзерновое пространство пироксена. Вторичные изменения выражены амфиболизацией и биотитизацией клинопироксена, в меньшей степени в виде образования карбоната в межзерновом пространстве и хлоритизации клинопироксена, развитии титанита в виде кайм вокруг зерен титаномагнетита и образовании отдельных кристаллов титанита внутри биотитовых агрегатов. Наблюдается последовательность вторичных замещений: клинопироксен — актинолит — хлорит. Вторичные изменения предполагаемого магматического биотита сопровождаются появлением титанита и более позднего биотита. Титанит образует мелкие зерна, при этом вблизи титанита биотит становится более светлым. Вторичный биотит частично замещает первично-магматические кристаллы либо выполняет трещины.

Габбро — это мелко-, среднезернистая порода серого цвета, состоит преимущественно из полевых шпатов (35–50%), амфибола (до 10%), биотита (до 20%), пироксена (15–30%); акцессорные минералы: апатит, цоизит, титанит. Иногда имеет трахитоидную текстуру, обусловленную ориентировкой кристаллов плагиоклаза (An — 30–40). В габбро две генерации амфибола: роговая обманка (паргасит) и актинолит. Роговая обманка по спайности замещается зеленым актинолитом и буроватым биотитом. Актинолит имеет зеленую окраску, плеохроирует от светло-зеленого до темно-зеленого.

Диориты представлены средне-мелкозернистой породой, которая по внешнему облику очень схожа с габбро. Основным минералом является плагиоклаз (до 50%). Темноцветные минералы представлены амфиболом (до 25%), клинопироксеном (до 15%), биотитом (до 10%).

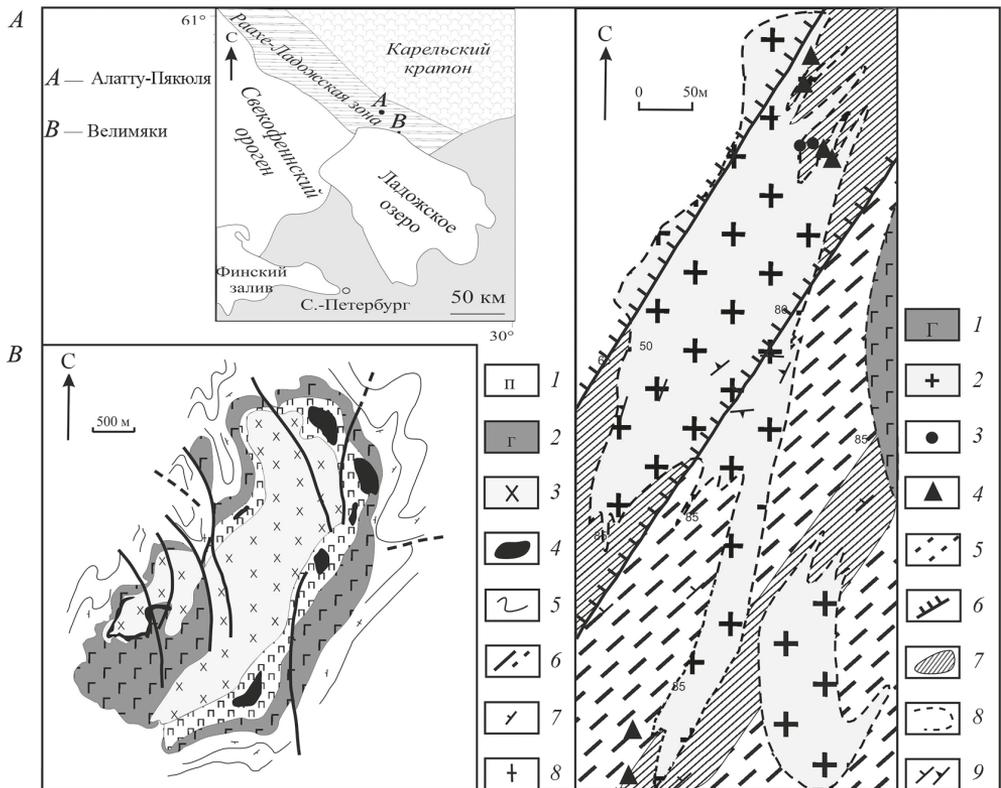


Рис. 1. Схемы тектонического районирования Северного Приладожья и геологического строения раннепротерозойских габброидных массивов: А — Алатту-Пякюля, В — Велимяки.

Массив Велимяки (слева): 1 — клинопироксениты; 2 — габбро; 3 — габбродиориты, диориты; 4 — рудоносные клинопироксениты, в том числе с сульфидным золотонесущим оруденением; 5 — гнейсы, сланцы ладожской серии; 6 — видимые и предполагаемые разломы; 7 и 8 — элементы залегания метаморфической полосчатости и сланцеватости: наклонные (7), вертикальные (8).

Западный фрагмент массива Алатту-Пякюля (справа) по (Ивашенко и Голубев, 2011): 1 — габбродиориты, габбро; 2 — тоналиты, гранодиориты, плагиограниты; 3 — риодацитовые кварцевые порфиры; 4 — эруптивные и эксплозивные брекчи, туффизитоподобные породы; 5 — углеродсодержащие алевролиты, кварцитопесчаники, кварциты ладожской серии; 6 — границы сдвиговых зон; 7 — зоны метасоматоза и золотонесущего оруденения; 8 — предполагаемые границы; 9 — элементы залегания плоскостных текстур пород (сланцеватость, полосчатость)

В габбро и диоритах широко проявлены вторичные изменения, выраженные наложенной калишпатизацией с образованием микроклина, что придает породе розоватый оттенок. Также вторичные изменения проявлены в виде биотитизации и карбонатизации, развивающейся по межзерновому пространству, и сосюритизации по спайности и трещинкам плагиоклаза; к этим участкам тяготеют образования цоизита в виде мелких синеватых зерен и скопления апатита.

О возрасте пород кааламского комплекса можно судить по возрасту кварцевых диоритов полифазного массива Кааламо, определенному U-Pb-методом по циркону как 1888 ± 5 млн лет (Богачёв и др., 1999). Этот возраст в пределах ошибки совпадает с U-Pb-цирконовым возрастом штока Алатту — 1885 ± 3 млн лет (Богачёв

и др., 1999). Близкий U-Pb-возраст получен для цирконов велимякского комплекса (массив Велимяки), выделенных из габбро, — 1894 ± 6 млн лет и клинопироксенитов — 1874 ± 24 млн лет (Алексеев, 2008). Все возрасты совпадают в пределах аналитической погрешности и не противоречат наблюдаемым геологическим соотношениям интрузий с окружающими их породами. Эти оценки согласуются и с U-Pb-изотопными возрастными цирконов других близких по составу и тектоническому положению габброидов и гранитоидов Северного Приладожья и прилегающей территории Финляндии (Балтыбаев и др., 2009).

Массивы Велимяки и Алатту-Пякюля содержат благороднометалльную минерализацию в зонах локальных сдвиговых деформаций и флюидной активности. Сдвиговые зоны содержат метасоматически измененные магматические породы, в которых распространены разнообразные рудные минералы: арсенопирит, халькопирит, пирит, пирротин, марказит, сфалерит, галенит и блеклые руды. Также в некоторых местах обнаружены самородная сурьма, электрум, самородное высокопробное золото.

В габброидах массива Велимяки есть два основных вида рудной минерализации: 1) титаномагнетитовая, сопровождаемая повышенными содержаниями апатита и ванадия; 2) благороднометалльная сульфидная.

Титаномагнетитовая минерализация локализована в клинопироксенитовых телах как вкрапленные или сплошные руды с содержанием титаномагнетита до 90 об. %. В титаномагнетите и ильмените отмечается до 2 вес. % V_2O_5 . В некоторых рудах встречается апатит (3–15 об. %).

Сульфидная вкрапленная и вкрапленно-прожилковая пирит-халькопиритовая или халькопирит-пирит-пирротиновая и пиритовая минерализация также приурочена к горизонтам клинопироксенитов, а наиболее обильная минерализация тяготеет к зонам трещиноватости и гидротермально-метасоматической переработки. Протяженность сульфидных жил составляет 1.5–2 м при мощности 15–20 см, иногда до 40 см. В зонах метасоматической переработки фиксируется зональность, связанная со стадийностью минералообразования: сначала развиваются биотит-амфиболовые ассоциации по роговообманковым клинопироксенитам, а затем — кварц-полевошпатовые и карбонатные парагенезисы, метасоматиты с турмалином, биотитом, эпидотом, хлоритом и микроклином. В зонах переработки обычны халькопирит, пирит, пирротин, реже сфалерит, пентландит, галенит, молибденит, кобальтин, арсенопирит и более редкие Ag-Bi-Te-фазы (гессит, теллуризмутит, штютцит, тетрадимит). Вкрапленно-прожилковые сульфидные руды местами содержат самородное золото, его зерна не превышают 150 мкм, а максимальное содержание — 1.2 г/т. В золоте присутствуют серебро и медь (Алексеев и др., 2005). Распределение золотосодержащих сульфидов контролируется зонами трещиноватости восток-северо-восточного простирания и приурочено к кварц-полевошпатовым жилам и эпидот-биотит-турмалин-хлорит-актинолитовым метасоматитам.

В рудах Алатту-Пякюля также выделяют несколько рудных парагенезисов (Иващенко и др., 2002). Ранние парагенезисы содержат молибденит и шеелит, затем появляются минералы Fe, As, Pb, Zn и сульфосоли сложного состава, сульфo-антимониды. Наиболее поздние парагенезисы включают гудмундиты, самородную сурьму и антимониты. Золотополисульфидный парагенезис развивается по

тектоническим зонам, где также встречается кварц-молибденитовая ассоциация вместе с маломощными кварцевыми жилами и прожилками северо-западного простирания. Иногда указанные руды наложены на кварц-арсенопиритовый парагенезис.

В региональном плане золотополисульфидная минерализация сосредоточена в северной и северо-восточной частях штока Пякюля, а позднейшая стадия золото-сурьмяного рудообразования обнаруживается в северо-восточной части Пякюля, куда внедряются небольшие тела риолит-дацитов (Иващенко и др., 2002).

3. Результаты исследования

Концентраты полевых шпатов выделялись в тяжелых жидкостях, затем монофракции полевых шпатов и сульфидов отбирались под бинокуляр, отмывались несколько раз в ультразвуковой ванне в чистой воде и растирались в пудру. Растертые пробы полевых шпатов сначала выщелачивались 0.5 часа в 0.5N HF при комнатной температуре, затем 4 часа в концентрированной (16N) HNO₃ при температуре 70 °C с последующим выдерживанием около 12 часов при комнатной температуре и после удаления раствора — по такой же схеме в концентрированной (12N) HCl. Выщелачивание полевых шпатов производилось для того, чтобы удалить возможно присутствующий радиогенный Pb, накопившийся из присутствующих в небольшом количестве минералов, содержащих U, а также из окислов железа (на которых может адсорбироваться U). Остаток после выщелачивания разлагался смесью концентрированных HF и HNO₃.

Навески растертых сульфидов предварительно выщелачивались 6 часов в 1N HBr при температуре 70 °C, затем 12 часов при комнатной температуре. Остаток после выщелачивания разлагался в HNO₃.

Анализ изотопного состава Pb проводился в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург). Химическое выделение Pb из полевых шпатов и сульфидов проводилось на анионообменной смоле Bio-RadAG1-X8 по методике Мане (Manhes et al., 1978); выделение U из полевых шпатов — на экстракционной смоле UTEVA SPEC.

Общий уровень лабораторного загрязнения Pb и U не превышал 0.08 и 0.002 ng соответственно. Измерение изотопного состава Pb и U выполнялось на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI. Измеренные изотопные отношения Pb исправлены на коэффициент фракционирования, установленный путем многократного определения изотопного состава Pb в стандарте SRM-982 и равный 0.13 % на единицу массы. Погрешности определения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb в образцах больше ошибок измерения и составляют 0.06, 0.09 и 0.12 % соответственно.

Расчеты изотопных отношений и содержания Pb и U проводились с использованием программы PBDAT (Ludwig, 1991). Расчеты проведены с помощью программы ISOPLOT (Ludwig, 1998).

Известно, что минералы с низким начальным U/Pb-отношением (после удаления радиогенного Pb), не подвергшиеся после формирования термальному воздействию, в ходе которого может произойти перераспределение элементов, должны отражать изотопный состав свинца источника пород. Иначе говоря, Pb-Pb-

изотопный состав таких минералов является генетической меткой происхождения магматических пород (Stacey and Kramers, 1975).

При описании эволюции изотопного состава Pb крупных стратиформных месторождений Стейси и Крамерс (Stacey and Kramers, 1975) рассчитали среднее значение μ_2 второй стадии (от 3.7 млрд лет до настоящего времени), которое оказалось равным 9.735. При этой величине μ_2 параметры эволюции Pb во времени отвечают среднему значению изотопного состава Pb-силикатной оболочки Земли, тогда как для верхнекоровых пород характерны более высокие значения, а для мантийных и нижнекоровых образований — более низкие. Мантийные и нижнекоровые образования, имеющие низкие значения μ_2 , различаются по величине $\kappa_2 = {}^{232}\text{Th}/{}^{238}\text{U}$. В терминах модели Стейси и Крамерса среднекоровое значение $\kappa_2 = {}^{232}\text{Th}/{}^{238}\text{U}$ равно 3.78. Для мантийных и верхнекоровых пород это значение должно быть несколько ниже, а для нижнекоровых — значительно выше.

Изотопные отношения ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$, ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ и параметры $\mu_2 = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$ для минералов приведены в таблице. Из этих данных и приведенной диаграммы (рис. 2) видно, что сравниваемые минералы имеют близкие характеристики, за исключением сульфидов и полевых шпатов массива Велимяки. Так, если сопоставление изотопных составов обыкновенного свинца полевых шпатов и рудного свинца сульфидов массива Велимяки показывает их резкое различие (у сульфидов изотопный состав Pb значительно более радиогенный, чем у полевых шпатов), то совершенно иначе обстоит дело с изотопными характеристиками свинца этих минералов в массиве Алатту-Пякюля (см. таблицу и рис. 2).

4. Обсуждение результатов

Наблюдаемые параметры изотопов свинца у минералов массива Велимяки можно объяснить, если предположить, что изотопный состав Pb полевых шпатов соответствует времени кристаллизации габброидов t_1 , а сульфиды образовались и захватили Pb в момент t_2 (время наложенного события), когда во вмещающих габброидах накопился радиогенный свинец за время от t_1 до t_2 . Однако расчет изохронного возраста по имеющейся совокупности измеренных аналитических данных определяет t_1 как ~2.2–2.0 млрд лет (в зависимости от выбранных точек анализов), что заметно древнее U-Pb-цирконового возраста (~1.9 млрд лет). Эта неопределенность со временем t_1 влияет на оценку t_2 , поэтому расчетная величина последней по трендам изотопных отношений в координатах ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ — ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ дается с широким интервалом 0.68–0.40 млрд лет (рис. 2). Но и данный диапазон возраста справедлив только при условии, что не было привноса свинца извне. Критерием отсутствия привноса свинца извне может служить изотопный состав свинца других минералов, главным образом имеющих низкое начальное U/Pb-отношение, к которым в первую очередь относятся полевые шпаты. Нам представляется, что в случае привноса радиогенного свинца в более позднее время изотопный состав полевых шпатов также неизбежно должен был сместиться в сторону повышения содержания радиогенной компоненты Pb. Такое явление отсутствует в изученных образцах. На основании изложенного делается вывод о сульфидном минералообразовании в момент времени t_2 , когда только новообразованные сульфиды захватили более радиогенный свинец системы.

Таблица. U-Pb-аналитические данные для полевых шпатов, пирита, пирротина из габброидов и руд массива Алатту-Пякюля и Велимяки Северного Приладожья

Номер образца	Минерал	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}^*$ (μ_2)
массив Алатту-Пякюля					
309	пирит	14.736	15.078	34.707	9.70
309А	пирит (массивная руда)	14.729	15.059	34.645	9.56
309Б	пирит (рассланцованная руда)	14.722	15.039	34.591	9.40
309А	плагиоклаз (массивная порода)	14.733 (14.747)	15.081 (15.083)	34.712	9.73
309Б	плагиоклаз (рассланцованная порода)	14.714 (14.740)	15.045 (15.048)	34.614	9.47
массив Велимяки					
976	полевой шпат	15.462 (15.435)	15.208 (15.205)	35.079	9.38
626-1	полевой шпат	15.389 (15.347)	15.178 (15.173)	34.944	9.28
Пр1	пирит	19.330	15.738	40.437	10.09
Пр1	пирротин	18.325	15.609	38.017	9.74
Пр2	пирит	19.960	15.830	41.337	10.38
Пр2	пирротин	20.303	15.895	38.858	10.6

Примечание. Изотопные составы Pb приведены с учетом поправки на коэффициент фракционирования. В скобках для полевых шпатов показаны значения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ с поправкой на содержание урана на возраст массивов.

* Модельное значение $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$.

Ниже обсуждаются дополнительные сведения (в основном изотопно-геохронологические результаты), на основании которых авторам представляется, что оценка вторичной золотосульфидной минерализации в более узком диапазоне (400–460 млн лет) кажется более реалистичной. Отметим, что близким к предполагаемому возрасту 400–460 млн лет получается и модельный возраст сульфидов — 450 млн лет — по пересечению линии регрессии с линией накопления свинца с $\mu_2 = 10.4$ (рис. 2).

Практически одинаковые изотопные составы свинца для полевых шпатов и сульфидов Алатту-Пякюля предполагают, что состав Pb этих минералов определяется изотопно-геохимическими параметрами среды в момент кристаллизации массива. Примечательно, что и у этих пород модельный Pb-возраст полевых шпатов и сульфидов (2150–2200 млн лет) оказался древнее возраста циркона. Этот факт объясняется тем, что на изотопные характеристики свинца минералов изученных массивов, расположенных близко к Карельскому кратону (рис. 1), оказывает заметное влия-

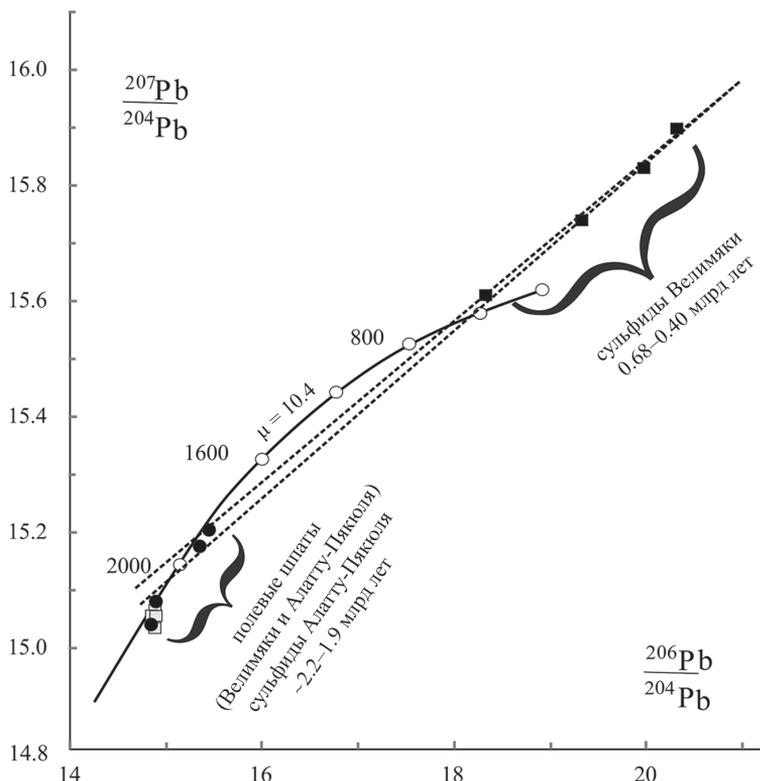


Рис. 2. Диаграммы изотопного состава Pb полевых шпатов, пирита и пирротина из габброидов массива Велимаяки и Алатту-Пякюля Северного Приладожья.

График эволюции свинца от 3–2.8 млрд лет при $\mu = 10.4$ (Stacey and Kramers, 1975; Nuhma, 1986) при начальных отношениях $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 13.356$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 14.534$. Квадраты — фигуративные точки сульфидов, залитые кружочки — полевые шпаты (плаггиоклаз и калиевый полевой шпат). Две возможные линии тренда t_1 – t_2 (см. текст) показаны штриховой линией

яние древняя архейская кора. Подобное обогащение коровым Pb наблюдалась при эпигенетической перекристаллизации ятулийских доломитов Карельского кратона в Прионежье (Овчинникова и др., 2007), а также при формировании эпигенетической сульфидной минерализации в рифейских доломитах Южного Урала (Овчинникова и др., 2000). Источник свинца сульфидов и полевых шпатов массива Алатту-Пякюля характеризуется параметрами $\mu_2 = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ от 9.4 до 9.75, что указывает на вовлечение вещества мантийно-нижнекорового резервуара в образование магмы.

5. Постсвекофенские эндогенные события

Одним из наиболее заметных постсвекофенских геологических процессов на юго-западе Фенноскандии является протяженный этап формирования гранитов рапакиви, охвативший период времени от 1.65 до 1.53 млрд лет (Vaasjoki and Rämö, 1989; Rämö et al., 1994; Andersson, 1997; Claesson and Kresten, 1997; и др.). Более позд-

ние события проявились не столь сильно, но накопившиеся на сегодняшний день геологические факты и наблюдения выявляют их повсеместность, хотя и слабую интенсивность. Так, например, проявлена фанерозойская гидротермальная минерализация с образованием жил с кальцитом, галенитом, флюоритом. Известны такие проявления двух типов: как прожилки в докембрийских породах разного состава или в виде рассеянной минерализации в позднекембрийских и раннекембрийских песчаниках; жилы в непосредственном окружении интрузивных пород в областях развития пермской магматической активности (грабен Осло, Норвегия, провинция Сконе, Швеция). Во вмещающих гидротермальные жилы породах с возрастом от архея до раннего — среднего протерозоя зоны гидротермальной минерализации иногда прослеживаются на несколько километров. Ниже приводится ряд примеров тектоно-термальной переработки свекофеннских и более древних пород на Фенноскандинавском щите, включая близко находящиеся к Северному Приладожью площади. Часть этих данных опубликована в научных отчетах (Alm et al., 2005a; 2005b) для компании Швеции, изучающей использование и утилизацию ядерного топлива, и предоставлена нам любезно К. Сундбладом (СПБГУ).

Sm-Nd-система в кальците и флюорите из жил, выявленных вдоль побережья Балтийского моря, изучалась с целью определения времени минерализации (Alm et al., 2005a; 2005b). В пределах Свекофеннского пояса были отобраны образцы из жил, обнаруженных внутри интрузий в провинциях Тиндеред и Гётемар в восточном Смоланде (Швеция), районе Ловиса (плутон выборгских гранитов рапакиви в юго-западной Финляндии) и вкрапленном флюорите из песчаника вблизи каледонского тектонического покрова (р-н Лаисвалл, Норвегия). Флюорит и кальцит содержали некоторое количество Sm и Nd, достаточное для проведения изотопного анализа; предполагается, что эти элементы замещают позицию Ca^{2+} в этих минералах.

Получен широкий разброс измеренных значений изотопных отношений Sm/Nd, дающий возраст кальцита и флюорита р-на Лаисвалл — 402 ± 57 млн лет или при использовании в уравнении регрессии фигуративных точек как кальцита, так и флюорита — 406 ± 10 млн лет. Для жил из тел гранитов Гётемар по анализу кальцита и флюорита определена Sm-Nd-изохрона 436 ± 18 млн лет. Для флюоритового прожилка в выборгских гранитах рапакиви получен Sm-Nd-изотопный возраст 407 ± 54 млн лет (6 образцов).

Несмотря на большую погрешность определения возраста, следует отметить, что полученные значения возраста близки к выявленным ранее оценкам времени мобилизации Pb в каледонидах с помощью Pb-Pb-датирования — 420 ± 3 млн лет (Stuckless et al., 1982) и Ar-Ar-датированием зонального калиевого полевого шпата песчаников в Центральной Швеции 403 ± 6 – 453 ± 8 млн лет (Sherlock et al., 2005).

В минералах вышеназванных гидротермальных жил найдены двухфазные газово-жидкие включения с низкими температурами гомогенизации — 100 – 150 °C и температурой плавления вещества, указывающей на минерализацию 15–26 вес. % NaCl-эквивалента. Эвтектические температуры у вещества включений показали присутствие солей Na, K, Ca, Mg. Эти результаты близки к ранее полученным результатам изучения газово-жидких включений (Lindblom, 1982): $T_{\text{гом}} = 120$ – 180 °C при солености флюида ~24 вес. % NaCl-эквивалента.

Силур-девонская тектоническая активизация и связанная с ней гидротермальная деятельность широко проявлены кроме скандинавских стран в Латвии и про-

слеживаются на территории России (Brangulis et al., 1993; Brangulis and Kanevs, 2002). Эти события предшествуют флювиальным отложениям Пражского стратиграфического уровня, когда формировались красноцветы. Согласно исследованиям (Gradstein et al., 2004), тектонические события в виде складчатости, аплифта и последующей эрозии заключены в рамки 410–415 млн лет.

Достаточно широко проявлены латентные постсвекофеннские геологические события в изотопно-геохимических особенностях протерозойских цирконов. Изученные нами цирконы (SHRIMP-II, ЦИИ «ВСЕГЕИ») из плагиогранитов Приладожья позволили выявить нижнее пресечение дискордии с линией конкордии на диаграмме Везерилла, соответствующее ~400 млн лет (Балтыбаев и др., 2005). Важно отметить, что в этих плагиогранитах (их U-Pb-цирконовый возраст — 1.88 млрд лет) обнаружены жильные скопления более поздних карбонатов. Эти и подобные данные позволяют предположить причинно-следственную связь между фанерозойской гидротермальной активностью и появлением возрастной метки ~400 млн лет в цирконах изученных пород Приладожья.

Ближе к каледонидам Норвегии известны многочисленные определения цирконового возраста пород, для которых нарушение U-Pb-системы связывается с термальным импульсом на рубеже ~400–420 млн лет назад, образованием ряда покровно-надвиговых структур с интенсивным метаморфизмом ранее существовавших пород. Примерами последних могут служить высокобарические ассоциации (эклогиты) и мигматиты Норвегии, распространенные в шовных зонах тектонического происхождения. Для циркона из пород свекофеннского возрастного уровня верхнее и нижнее пересечения линии дискордии с конкордией сопоставляют соответственно со свекофеннским орогенезом и каледонской коллизией. Подобная интерпретация поведения U-Pb-системы в цирконах приводилась не только для пород каледонского блока (Skär, 2002), но и для пород свекофеннского блока на территории Швеции (Högdahl et al., 2001).

Следует отметить, что шведские исследователи (Larson and Tullborg, 1998) были первыми, кто оценил значение нижних пересечений дискордии с конкордией на U-Pb-диаграммах цирконов: они отметили роль каледонской термально-флюидной активизации при ремобилизации Pb с нарушением U-Pb-системы преимущественно метамиктных цирконов.

Непосредственному изучению каледонской активизации и перераспределению Pb-Pb-изотопной системы сульфидов посвящена работа (Romer, 1992). В указанной статье анализируется переуравновешивание изотопов свинца из свинец-цинковых месторождений в песчаниках из ряда месторождений Скандинавии (включая упомянутые выше регионы в Швеции). Автором делается вывод о том, что перераспределение изотопов Pb в сульфидах происходило благодаря широкомасштабному (large-scale) циркулированию по проницаемым зонам в свекофеннских породах гидротермального флюида в каледонскую орогению.

Если обратиться к современному банку данных U-Pb-возрастов циркона из различных пород в пределах Свекофеннской провинции, то можно увидеть, что большинство цирконов с возрастом ~1.9–1.7 млрд лет имеют нижнее пересечение линии дискордии с конкордией, стремящееся к началу координат на диаграммах $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ — $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, но также существенная их часть имеет нижнее пересечение, значительно отличающееся от нуля (рис. 3). Статистически примерно треть

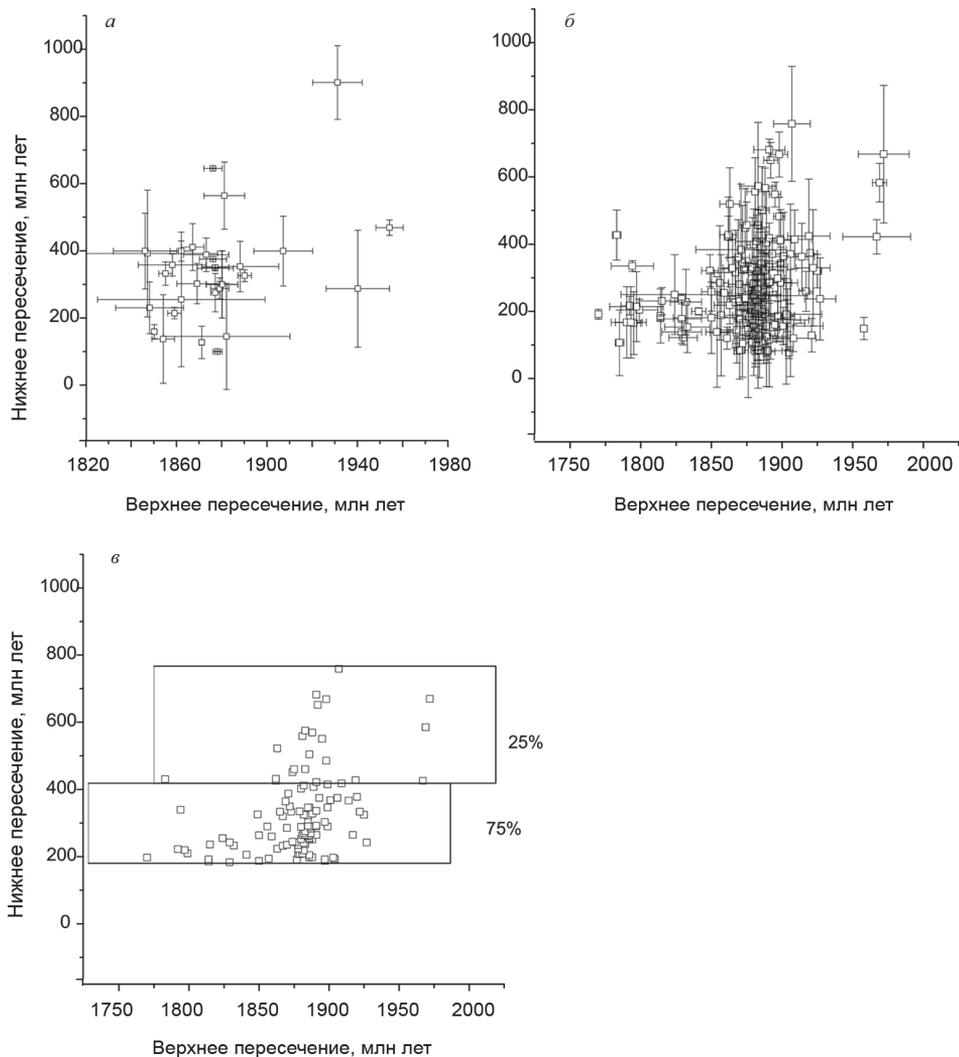


Рис. 3. U-Pb-возрасты циркона пород Свеккофеннского пояса, полученные по верхнему (абсцисса) и нижнему (ордината) пересечениям линии дискордии с линией конкордии: а — свеккофеннские породы на территории Швеции, б и в — на территории Финляндии и России.

На диаграммах а и б также показаны погрешности определения возраста, на диаграмме в — только значение возраста. Использованы опубликованные данные, частично представленные в (Larson and Tullborg, 1998; Балтыбаев и др., 2009)

цирконов несет в себе признаки фанерозойской активизации. Отметим, что такие цирконы обнаружены на значительном удалении от каледонид Норвегии — не только в Финляндии, но и вплоть до территории Северного Приладожья в России (рис. 3, б, в). Непосредственно на площади развития свеккофеннских пород в Северном Приладожье выявлена поздняя минерализация с Pb-Pb-возрастом галенита 450 млн лет, которую связывают с извлечением в каледонскую эпоху радиогенного Pb из гранитов рапакиви (Ларин, 2011).

6. Заключение

Полученные данные и обобщение опубликованных ранее результатов исследований позволяют сделать ряд заключений.

1. Изотопные характеристики Pb полевых шпатов массива Велимяки значительно отличаются от характеристик Pb сульфидов; более радиогенный состав свинца сульфидной (пирит-пирротиновой) минерализации, с которой связано появление золота, отвечает каледонскому этапу флюидно-термальной переработки раннепротерозойских магматических минеральных парагенезисов. Каледонский этап нового флюидно-термального минералообразования в свекофеннских породах проявлен широко, хотя и не везде одинаково интенсивно.
2. Полевые шпаты и сульфиды массива Алатту-Пякюля имеют весьма сходные изотопные параметры Pb и практически одинаковые Pb-модельные возрасты, что говорит о формировании породообразующих и рудных ассоциаций массива во время свекофеннских (раннепротерозойских) плутонических и тектоно-термальных событий.
3. Локализация рудных минералов свекофеннского и каледонского этапов тектогенеза определяется как региональными, так и локальными особенностями развития зон флюидно-термальной переработки в породах. В одних случаях это могут быть протяженные на сотни метров или несколько километров зоны гидротермальной минерализации, а в других — не превышающие нескольких десятков метров маломощные тектонические зоны с наложенным гидротермально-метасоматическим минералообразованием.

Литература

- Алексеев, И. А. (2008). *Геология и рудоносность массива Вялимяки (Северное Приладожье)*. Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПбГУ.
- Алексеев, И. А., Котова, И. К. (2010). Геологическое строение и рудоносность массива Вялимяки (Северное Приладожье). В: *Сборник трудов молодых ученых ИГГД РАН*. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 47–82.
- Алексеев, И. А., Котова, И. К., Петров, С. В. (2005). Рудопроявление золота в массиве Вялимяки (Северное Приладожье). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*, (3), 107–110.
- Алексеев, И. А., Кулешевич, Л. В. (2017). Благороднометалльная минерализация массива Вялимяки (Северное Приладожье, Карелия). *Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Геология докембрия*, (2), 60–72.
- Балтыбаев, Ш. К., Бережная, Н. Г., Глебовицкий, В. А., Левский, Л. К., Левченков, О. А., Матуков, Д. И. (2005). U-Pb датирование циркона интрузии плагиогранитов в свекофеннидах юго-востока Балтийского щита: особенности верхнего и нижнего пересечения дискордии с конкордией. *Доклады АН*, 402 (6), 800–803.
- Балтыбаев, Ш. К., Глебовицкий, В. А., Козырева, И. В., Конопелько, Д. Л., Левченков, О. А., Седова, И. С., Шульдинер, В. И. (2000). *Геология и петрология свекофеннии Приладожья*. Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та.
- Балтыбаев, Ш. К., Левченков, О. А., Левский, Л. К. (2009). *Свекофеннский пояс Фенноскандии: пространственно-временная корреляция раннепротерозойских эндогенных процессов*. Санкт-Петербург: Наука.
- Балтыбаев, Ш. К., Овчинникова, Г. В., Глебовицкий, В. А., Алексеев, И. А., Васильева, И. М., Ризванова, Н. Г. (2017). Каледонское время образования золотосодержащих сульфидных руд в ранне-

- протерозойских габброидах Северного Приладожья. *Доклады АН*, 476 (2), 181–185. <https://doi.org/10.7868/S0869565217260139>
- Богачёв, В. А., Беляцкий, Б. В., Гольцин, Н. А., Иваников, В. В., Иващенко, В. И., Крымский, Р. Ш., Сергеев, С. А. (2013). Изохронный Re-Os возраст молибденитов раннедокембрийских порфировых месторождений Карелии. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*, (2), 3–20.
- Богачёв, В. А., Иваников, В. В., Козырева, И. В., Конопелько, Д. Л., Левченков, О. А., Шульдинер, В. И. (1999). Результаты U-Pb цирконового датирования синорогенных габбро-диоритовых и гранитоидных интрузий (1.89–1.87 GA) Северного Приладожья. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*, (3), 23–31.
- Иващенко, В. И., Голубев, А. И. (2011). *Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы*. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН.
- Иващенко, В. И., Лавров, О. Б., Кондрашова, Н. И. (2008). Перспективы рудоносности (Ni, Cu, Pt, Pd, Au) Кааламского и Велимякского массивов Северного Приладожья. В: *Проблемы рудогенеза докембрийских щитов, труды всерос. науч. конф., Апатиты, 17–18 ноября 2008 г.* Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 98–101.
- Иващенко, В. И., Ручьев, А. М., Лавров, О. Б., Кондрашова, Н. И. (2002). Рудопроявление Пякюля — новый высокоперспективный тип благороднометалльного оруденения в докембрии Карелии. *Доклады АН*, 384 (2), 232–237.
- Кратц, К. О. (ред.) (1976). *Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы докембрия Карелии*. Ленинград: Наука.
- Лавров, О. Б., Кулешевич, Л. В. (2016). Перспективы поисков платиноидов в массивах Кааламского дифференцированного комплекса (Северное Приладожье, Карелия). *Отечественная геология*, (3), 46–56.
- Ларин, А. М. (2011). *Граниты рапакиви и ассоциирующие породы*. Санкт-Петербург: Наука.
- Овчинникова, Г. В., Васильева, И. М., Семихатов, М. А., Горохов, И. М., Кузнецов, А. Б., Гороховский, Б. М., Левский, Л. К. (2000). Возможности Pb-Pb датирования карбонатных пород с нарушенными U-Pb системами: миньярская свита стратотипа верхнего рифея, Южный Урал. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 8 (6), 3–19.
- Овчинникова, Г. В., Кузнецов, А. Б., Мележик, В. А., Горохов, И. М., Васильева, И. М., Гороховский, Б. М. (2007). Pb-Pb возраст ятулийских карбонатных пород: туломозерская свита юго-восточной Карелии. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 15 (4), 20–33.
- Саранчина, Г. М. (1948). Петрология Вялимякской интрузии и связанное с нею рудопоявление. *Известия Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР*, (2), 32–42.
- Саранчина, Г. М. (1949). Петрология Кааламской интрузии (юго-западная Карелия). *Известия Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР*, (2), 57–80.
- Светов, А. П., Свириденко, Л. П., Иващенко, В. И. (1990). *Вулкано-плутонизм свекокарелид Балтийского щита*. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН.
- Шаров, Н. В. (ред.) (2020). *Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения)*. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН.
- Alm, E., Huhma, H. and Sundblad, K. (2005a). *Preliminary Palaeozoic Sm-Nd ages of fluorite-calcite-galena veins in the southeastern part of the Fennoscandian Shield*. [report] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB Rapport R-04-27. Stockholm.
- Alm, E., Sundblad, K. and Huhma, H. (2005b). *Sm-Nd isotope determinations of low-temperature fluorite-calcite-galena mineralization in the margins of the Fennoscandian Shield*. [report] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB Rapport R-05-66. Stockholm.
- Andersson, U. B. (1997). *The late Svecofennian, high-grade contact and regional metamorphism in southwestern Bergslagen (central southern Sweden)*. [report] Final report 970519, SGU-project 03-819/93.
- Brangulis, A. and Kanevs, S. (2002). *Latvijas Tektonika*. Riga.
- Brangulis, A. P., Kanev, S. V., Margulis, L. S. and Pomerantseva, R. A. (1993). Geology and hydrocarbon prospects of the Paleozoic in the Baltic region. In: J. R. Parker, ed., *Petroleum Geology of NW Europe. Proceedings of the 4th Conference, March — April, 1992*. London: Geological Society, 651–656.
- Claesson, S. and Kresten, P. (1997). The anorogenic Noran granite — a Mesoproterozoic rapakivi massif in south-central Sweden. *Geologiska Foreningens i Stockholm Forhandlingar*, 119, 115–122. <https://doi.org/10.1080/11035899709546466>

- Gradstein, F., Ogg, J. and Smith, A. (eds). (2005). *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511536045>
- Högdahl, K., Gromet, L. P. and Broman, C. (2001). Low P-T Caledonian resetting of U-rich Paleoproterozoic zircons, Central Sweden. *American Mineralogist*, 86, 534–546.
- Huhma, H. (1986). Sm-Nd, U-Pb and Pb-Pb isotopic evidence for the origin of the early Proterozoic Svecofokarelian crust in Finland. In: *Geological Survey of Finland, Bulletin*, 337. Espoo.
- Larson, S. A. and Tullborg, E.-L. (1998). Why Baltic Shield zircons yield late Paleozoic, lower-intercept ages on U-Pb Concordia. *Geology*, 26 (10), 919–922.
- Lindblom, S. (1982). *Fluid inclusion studies of the Laisvall sandstone lead-zinc deposit, Sweden*. Stockholm: Stockholm University Press.
- Ludwig, K. R. (1991). PbDAT for MS-DOS, version 1.21. *U.S. Geological Survey Open-File Rept.*, 88–542.
- Ludwig, K. R. (1998). *Isoplot/Ex. Version 1.00. A geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, no. 1.
- Manhes, G., Minster, J. E. and Allegre, C. J. (1978). Comparative uranium-thorium-lead and rubidium-strontium study of the Severin amphoterite: consequences for Early Solar System chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 39 (1), 14–24.
- Rämö, T., Haapala, I. and Salonsaari, P. (1994). Rapakivi granite magmatism: implications for lithospheric evolution. In: M. Pajunen, ed., *High temperature-low pressure metamorphism and deep crustal structures. Meeting of IGCP project 304 "Deep Crustal Processes" in Finland, 16–20 Sept. 1994. Geological Survey of Finland, Guide*, 37, 61–68.
- Romer, R. L. (1992). Sandstone-hosted lead-zinc mineral deposits and their relation to the tectonic mobilization of the Baltic shield during the Caledonian orogeny — a reinterpretation. *Mineralogy and Petrology*, 47, 67–85.
- Sherlock, S., Tim, L., Kelley, S. and Barnicoat, A. (2005). A high resolution record of multiple diagenetic events: Ultraviolet laser microprobe Ar/Ar analysis of zoned K-feldspar overgrowths. *Earth and Planetary Science Letters*, 238, 329–341.
- Skär, O. (2002). U-Pb geochronology and geochemistry of early Proterozoic rocks of the tectonic basement windows in central Nordland, Caledonides of north-central Norway. *Precambrian Research*, 116, 265–283.
- Stacey, J. S. and Kramers, J. D. (1975). Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26 (2), 207–221.
- Stuckless, J. S., Troeng, B., Hedge, C. E., Nkomo, I. T. and Simmons, K. R. (1982). Age of uranium mineralization at Lilljuthatten, Sweden, and constraints on the ore genesis. In: *Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. C (798)*. Uppsala: Schmidts Boktryckeri AB, Helsingborg.
- Vaasjoki, M. and Rämö, O. T. (1989). New zircon age determinations from the Wiborg rapakivi batholith, southeastern Finland. *Geological Survey of Finland, Special Paper*, 8, 132.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2019 г.

Статья рекомендована в печать 18 июня 2021 г.

Контактная информация:

Балтыбаев Шаукет Каимович — shauket@mail.ru
 Овчинникова Галина Владимировна — galinaovch@gmail.com
 Кузнецов Антон Борисович — antonbor9@mail.ru
 Васильева Ирина Михайловна — vasilievaim@yandex.ru
 Ризванова Наиля Гаттрахмановна — rizng@mail.ru
 Алексеев Иван Александрович — i.alekseev@spbu.ru
 Кириллова Полина Алексеевна — polinageo94@gmail.com

Two stage of gold-bearing sulfide ores of early Proterozoic gabbroids in the North Ladoga area*

Sh. K. Baltybaev^{1,2}, G. V. Ovchinnikova¹, A. B. Kuznetsov^{1,2},
I. M. Vasilieva¹, N. G. Rizvanova¹, I. A. Alekseev², P. A. Kirillova^{1,2}

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology

of the Russian Academy of Sciences,

2, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Baltybaev, Sh. K., Ovchinnikova, G. V., Kuznetsov, A. B., Alekseev, I. A., Vasilieva, I. M., Rizvanova, N. G., Kirillova, P. A. (2021). Two stage of gold-bearing sulfide ores of early Proterozoic gabbroids in the North Ladoga area. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (3), 559–577. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.307> (In Russian)

The article presents a study based on Pb isotopes, which revealed that the formation of gold-sulfide mineralization in the Early Proterozoic gabbros of the Northern Ladoga region is associated with different tectonic phases. This conclusion is based on the comparative analysis of isotopic data for feldspars and lead sulfides in two Early Proterozoic intrusions: Velimäki and Alattu-Päkyälä. The investigated intrusions have similar geological settings at the junction of the Svecofennian accretionary complex and the Karelian craton. Both massifs are characterized by manifestations of noble metal sulfide mineralization associated with zones of local shear deformations. The formation of the studied ore massifs is attributed to the Svecofennian and Caledonian tectonic stages. Feldspars of Velimäki intrusion have parameters and a model age of Pb, significantly older than the U-Pb age of zircon (1.9 Ga), even though they correspond to the Svecofennian time of magmatic crystallization of gabbro and clinopyroxenites. Sulfide pyrite-pyrrhotite mineralization is associated with gold in these rocks with the Caledonian stage of fluid-thermal processing of the Early Proterozoic magmatic mineral parageneses. Feldspars and sulfides of the Alattu-Päkyälä intrusion have similar lead isotopic parameters and a Pb model age (~2 Ga), also somewhat older than the U-Pb age of zircon, but at the same time indicating the formation of rock-forming and ore sulfide associations with gold during the Svecofennian (Early Proterozoic) plutonic and tectonic-thermal events. The source of lead sulfides of the Velimäki massif is characterized by the parameters of the upper crust with high $\mu_2 = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$, while the μ_2 parameter of the minerals of the Alattu-Päkyälä massif is slightly lower, which indicates the participation of the mantle-lower crustal reservoir material in the formation of magma.

Keywords: isotope composition of lead, Ladoga region, gabbroides, sulfides.

References

- Alekseev, I. A. (2008). *Geology and ore bearing of the Velimäki intrusion (Northern Ladoga area)*. Dr. Sci. thesis. St. Petersburg State University, St. Petersburg. (In Russian)
- Alekseev, I. A. and Kotova, I. K. (2010). Geological structure and ore content of the Vyalimyaki massif (Northern Ladoga area). In: *Collection of works of young scientists IGGD RAS*. St. Petersburg: Publishing house of Polytechnic University, 47–82. (In Russian)
- Alekseev, I. A. and Kuleshevich, L. V. (2017). Noble metal mineralization of the Vyalimyaki massif (Northern Ladoga area, Karelia). *Transactions of KarRC RAS. Precambrian Geology*, (2), 60–72. (In Russian)
- Alekseev, I. A., Kotova, I. K. and Petrov, S. V. (2005). The gold ore mineralization in the Velimäki intrusion (Northern Ladoga area). *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*, (3), 107–110. (In Russian)

* This work was supported by the research scientific project of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences (no. FMUW-2019-0003) of The Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

- Alm, E., Huhma, H. and Sundblad, K. (2005a). *Preliminary Palaeozoic Sm-Nd ages of fluorite-calcite-galena veins in the southeastern part of the Fennoscandian Shield*. [report] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB Rapport R-04-27. Stockholm.
- Alm, E., Sundblad, K. and Huhma, H. (2005b). *Sm-Nd isotope determinations of low-temperature fluorite-calcite-galena mineralization in the margins of the Fennoscandian Shield*. [report] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB Rapport R-05-66. Stockholm.
- Andersson, U. B. (1997). *The late Svecofennian, high-grade contact and regional metamorphism in southwestern Bergslagen (central southern Sweden)*. [report] Final report 970519, SGU-project 03-819/93.
- Baltybaev, Sh. K., Berezhaia, N. G., Glebovitskii, V. A., Levskii, L. K., Levchenkov, O. A. and Matukov, D. I. (2005). U-Pb dating of zircon of plagiogranite intrusion in bectophennids of the southeastern Baltic Shield: features of the upper and lower intersection of discordia with Concordia. *Doklady Earth Sciences*, 403 (5), 750–753.
- Baltybaev, Sh. K., Glebovitsky, V. A., Kozyreva, I. V., Konopel'ko, D. L., Levchenkov, O. A., Sedova, I. S. and Shul'diner, V. I. (2000). *Geology and petrology of Svecofennids of the Ladoga area*. St. Petersburg: St. Petersburg University Press. (In Russian)
- Baltybaev, Sh. K., Levchenkov, O. A. and Levskij, L. K. (2009). *Svecofennian belt of Fennoscandia: spatial-temporal correlation of the Early Proterozoic endogenous processes*. St. Petersburg: Nauka Publ. (In Russian)
- Baltybaev, Sh. K., Ovchinnikova, G. V., Glebovitskii, V. A., Alekseev, I. A., Vasil'eva, I. M. and Rizvanova, N. G. (2017). Caledonian formation of gold-bearing sulfides of Early Proterozoic gabbroids in the North Ladoga Area. *Doklady AN*, 476 (1), 992–996. <https://doi.org/10.7868/S0869565217260139> (In Russian)
- Bogachev, V. A., Belyatsky, B. V., Goltsin, N. A., Ivanikov, V. V., Ivaschenko, V. I., Krymsky, R. S. and Sergeev, S. A. (2013). Re-Os molybdenite isochron age for early precambrian porphyry deposits in Karelia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*, (2), 3–20. (In Russian)
- Bogachev, V. A., Ivanikov, V. V., Kozyreva, I. V., Konopel'ko, D. L., Levchenkov, O. A. and Shul'diner, V. I. (1999). U-Pb zircon dating of sinorogenic gabbro-diorite and granitic intrusions of the Northern Ladoga area. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*, (3), 23–33. (In Russian)
- Brangulis, A. and Kanevs, S. (2002). *Latvijas Tektonika*. Riga.
- Brangulis, A. P., Kanev, S. V., Margulis, L. S. and Pomerantseva, R. A. (1993). Geology and hydrocarbon prospects of the Paleozoic in the Baltic region. In: J. R. Parker, ed., *Petroleum Geology of NW Europe. Proceedings of the 4th Conference, March — April, 1992*. London: Geological Society, 651–656.
- Claesson, S. and Kresten, P. (1997). The anorogenic Noran granite — a Mesoproterozoic rapakivi massif in south-central Sweden. *Geologiska Foreningens i Stockholm Forhandlingar*, 119, 115–122. <https://doi.org/10.1080/11035899709546466>
- Gradstein, F., Ogg, J. and Smith, A. (eds). (2005). *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511536045>
- Högdahl, K., Gromet, L. P. and Broman, C. (2001). Low P-T Caledonian resetting of U-rich Paleoproterozoic zircons, Central Sweden. *American Mineralogist*, 86, 534–546.
- Huhma, H. (1986). Sm-Nd, U-Pb and Pb-Pb isotopic evidence for the origin of the early Proterozoic Svecofennian crust in Finland. In: *Geological Survey of Finland, Bulletin*, 337. Espoo.
- Ivaschenko, V. I., Lavrov, O. B. and Kondrashova, N. I. (2008). Prospects for ore content (Ni, Cu, Pt, Pd, Au) of the Kaalam and Velimyak massifs of the North Ladoga area. In: *Problems of ore genesis of Precambrian shields, Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Apatity, 17–18 Nov. 2008*. Apatity: KSC RAS Publ., 98–101. (In Russian)
- Ivashchenko, V. I. and Golubev, A. I. (2011). *Gold and platinum of Karelia: genetic types of mineralization and prospects*. Petrozavodsk: KarRC RAS Publ. (In Russian)
- Ivashchenko, V. I., Ruch'ev, A. M., Lavrov, O. B. and Kondrashova, N. I. (2002). Pyakyulya ore occurrence is a new highly promising type of noble metal mineralization in Precambrian Karelia. *Doklady AN*, 384 (2), 232–237. (In Russian)
- Kratz, K. O. (ed.) (1976). *Intrusive mafic-ultramafic complexes of the Precambrian of Karelia*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Larin, A. M. (2011). *Rapakivi Granites and Associated Rocks*. St. Petersburg: Nauka Publ. (In Russian)
- Larson, S. A. and Tullborg, E.-L. (1998). Why Baltic Shield zircons yield late Paleozoic, lower-intercept ages on U-Pb Concordia. *Geology*, 26 (10), 919–922.
- Lavrov, O. B. and Kuleshevich, L. V. (2016). Prospects for prospecting for platinoids in the massifs of the Kaalam differentiated complex (Northern Ladoga area, Karelia). *Domestic geology*, (3), 46–56. (In Russian)

- Lindblom, S. (1982). *Fluid inclusion studies of the Laisvall sandstone lead-zinc deposit, Sweden*. Stockholm: Stockholm University Press.
- Ludwig, K. R. (1991). PbDAT for MS-DOS, version 1.21. *U.S. Geological Survey Open-File Rept.*, 88–542.
- Ludwig, K. R. (1998). *Isoplot/Ex. Version 1.00. A geochronology Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, no. 1.
- Manhes, G., Minster, J. E. and Allegre, C. J. (1978). Comparative uranium-thorium-lead and rubidium-strontium study of the Severin amphoterite: consequences for Early Solar System chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 39 (1), 14–24.
- Ovchinnikova, G. V., Kuznetsov, A. B., Melezhik, V. A., Gorokhov, I. M., Vasil'eva, I. M. and Gorokhovskii, B. M. (2007). Pb-Pb age of Jatulian carbonate rocks: The Tulomozero Formation of Southeast Karelia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 15 (4), 359–372. <https://doi.org/10.1134/S0869593807040028>
- Ovchinnikova, G. V., Vasil'eva, I. M., Semikhatov, M. A., Gorokhov, I. M., Kuznetsov, A. B., Gorokhovskii, B. M. and Levskii, L. K. (2000). The Pb-Pb trail dating of carbonates with open U-Pb systems: the Myn'yar Formation of the Upper Riphean stratotype, southern Urals. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 8 (6), 529–543.
- Rämö, T., Haapala, I. and Salonsaari, P. (1994). Rapakivi granite magmatism: implications for lithospheric evolution. In: M. Pajunen, ed., *High temperature-low pressure metamorphism and deep crustal structures. Meeting of IGCP project 304 "Deep Crustal Processes" in Finland, 16–20 Sept. 1994*. Geological Survey of Finland, Guide, 37, 61–68.
- Romer, R. L. (1992). Sandstone-hosted lead-zinc mineral deposits and their relation to the tectonic mobilization of the Baltic shield during the Caledonian orogeny — a reinterpretation. *Mineralogy and Petrology*, 47, 67–85.
- Saranchina, G. M. (1948). Petrology of the Vyalimyak intrusion and associated ore occurrence. *Izvestiia Karelo-Finskoi nauchno-issledovatel'skoi bazy AN SSSR*, (2), 32–42. (In Russian)
- Saranchina, G. M. (1949). Petrology of the Kaalam intrusion (southwestern Karelia) *Izvestiia Karelo-Finskoi nauchno-issledovatel'skoi bazy AN SSSR*, (2), 57–80. (In Russian)
- Sharov, N. V. (ed.) (2020). *Proterozoic Ladoga structure (geology, deep structure and mineral genesis)*. Petrozavodsk: KarRC RAS Publ. (In Russian)
- Sherlock, S., Tim, L., Kelley, S. and Barnicoat, A. (2005). A high resolution record of multiple diagenetic events: Ultraviolet laser microprobe Ar/Ar analysis of zoned K-feldspar overgrowths. *Earth and Planetary Science Letters*, 238, 329–341.
- Skär, O. (2002). U-Pb geochronology and geochemistry of early Proterozoic rocks of the tectonic basement windows in central Nordland, Caledonides of north-central Norway. *Precambrian Research*, 116, 265–283.
- Stacey, J. S. and Kramers, J. D. (1975). Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26 (2), 207–221.
- Stuckless, J. S., Troeng, B., Hedge, C. E., Nkomo, I. T. and Simmons, K. R. (1982). Age of uranium mineralization at Lilljuthatten, Sweden, and constraints on the ore genesis. In: *Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. C (798)*. Uppsala: Schmidts Boktryckeri AB, Helsingborg.
- Svetov, A. P., Sviridenko, L. P. and Ivashchenko, V. I. (1990). *Volcano-plutonism of the beetroot of the Baltic Shield*. Petrozavodsk: KarRC RAS Publ. (In Russian)
- Vaasjoki, M. and Rämö, O. T. (1989). New zircon age determinations from the Wiborg rapakivi batholith, southeastern Finland. *Geological Survey of Finland, Special Paper*, 8, 132.

Received: October 25, 2019

Accepted: June 18, 2021

Contact information:

Shauket K. Baltybaev — shauket@mail.ru
 Galina V. Ovchinnikova — galinaovch@gmail.com
 Anton B. Kuznetsov — antonbor9@mail.ru
 Irina M. Vasilyeva — vasilievaim@yandex.ru
 Nailya G. Rizvanova — rizng@mail.ru
 Ivan A. Alekseev — i.alekseev@spbu.ru
 Polina A. Kirillova — polinageo94@gmail.com