

На правах рукописи



Максимов Олег Александрович

**МЕТАМОРФИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГРИДИНСКОГО
ЭКЛОГИТСОДЕРЖАЩЕГО КОМПЛЕКСА
(ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ)**

1.6.3 – Петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Карельский научный центр Российской академии наук» (КарНЦ РАН), г. Петрозаводск.

Научный руководитель:

Володичев Олег Иванович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии Карельского научного центра РАН (ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск)

Официальные оппоненты:

Балтыбаев Шаукет Каимович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией петро- и рудогенеза Института геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург)

Скузоватов Сергей Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится 29 февраля 2024 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovetu>

Автореферат разослан «19» января 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.050.01, к.г.-м.н.



А.В. Котляров

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета к.г.-м.н. Котляров А.В. по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3 и в формате pdf на email: kotlyarov@igm.nsc.ru

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Эклогиты входят в состав метаморфических комплексов субдукционных и коллизионных геодинамических систем Земли. Зафиксированные в парагенезисах эклогитов P-T тренды метаморфических преобразований являются критически важными для оценки состояния литосферы, вовлеченной в эти геодинамические процессы. Петрологическим и геохронологическим исследованиям эклогитов уделяется большое внимание (Добрецов, 1998; Stern, 2005; O'Brien, 2018; Brown, Johnson, 2018), но особый интерес у исследователей вызывают раннедокембрийские коровые эклогиты в полиметаморфическом комплексе Беломорской провинции (БП) Фенноскандинавского щита (Володичев и др., 2004; Минц и др., 2010; Brown, 2006; Скублов и др., 2010, 2011, 2012, 2016; Perchuk, Morgunova, 2014; Li et al., 2015, 2023; Volodichev et al., 2014, 2021; Balagansky et al., 2015, 2019; Imayama et al., 2017; Yu et al., 2017, 2019; Brown, Johnson, 2018; Козловский и др., 2020; Mints, Dokukina, 2020; Skublov et al., 2021; Melnik et al., 2021; Максимов и др., 2022 и др.). Непростой задачей остается выявление в них первичного парагенезиса граната и омфациита из-за ретроградных метаморфических изменений эклогитов в ходе эксгумации и последующих наложенных процессов. Эклогиты Гридинского эклогитосодержащего комплекса (ГЭК) БП являются одними из наиболее перспективных пород для реконструкции эволюции метаморфизма в раннем докембрии, так как содержат реликты разновозрастных гранат-омфациитовых парагенезисов. Изучение ГЭК дает возможность рассмотреть особенности метаморфизма фациальных спутников эклогитов – ортопироксенитов и цоизититов, а также эндербитов. Реконструкция полихронной истории метаморфизма ГЭК – важный источник информации об изменении состояния раннедокембрийской литосферы, что является основой для моделирования геодинамических процессов, контролировавших ее развитие в раннем докембрии (Herzberg et al., 2010; Perchuk et al., 2020).

Изучение раннедокембрийских метаморфических комплексов (ГЭК) позволяет реконструировать процессы высокобарного метаморфизма для широкого ряда составов протолитов в интервале времени ~2.7–1.9 млрд лет.

Объект исследования – раннедокембрийский Гридинский эклогитосодержащий комплекс Беломорской провинции Фенноскандинавского щита.

Цели и задачи работы. Цель исследования заключалась в реконструкции условий метаморфической эволюции пород ГЭК.

Задачи включали:

1) детальное картирование ключевых участков для определения геологических соотношений компонентов ГЭК;

- 2) минералого-петрографическое изучение пород ГЭК с выявлением главных минеральных парагенезисов;
- 3) оценку P-T условий формирования пород на разных этапах метаморфической эволюции;
- 4) определение возраста главных этапов метаморфических преобразований;
- 5) построение P-T-t трендов для пород ГЭК.

Научная новизна и практическое значение. Впервые для раннедокембрийских эклогитов в породах ГЭК выделены и обоснованы два разновозрастных этапа эклогитового метаморфизма. Построены два (архейский и палеопротерозойский) ретроградных P-T-t тренда. Обнаружены включения омфациита в метаморфическом цирконе с возрастом 2.7 млрд лет в эклогитах, а также архейские высокобарные парагенезисы в гранатовых ортопироксенитах и цоизититах, доказывающие существование ранее дискуссионного архейского эклогитового метаморфизма. Впервые установлено, что эндербиты ГЭК сформировались в неoarхее (около 2.7 млрд лет) и маркируют одну из поздних стадий архейского цикла становления комплекса. Впервые установлены омфациит-гранатовые включения в двух возрастных группах метаморфических цирконов эклогитов (2.7 и 1.9 млрд лет) и доказано двукратное проявление эклогитового метаморфизма в раннем докембрии.

В результате проведенных исследований впервые детализированы метаморфические преобразования эклогитов (Максимов, 2019, 2022; Максимов и др., 2021; Maksimov et al., 2019), гранатовых ортопироксенитов (Максимов, 2014), цоизититов (Слабунов,..., Максимов, 2015), эндербитов (Сибелев,..., Максимов, 2013) и построена карта геологического строения ГЭК. Установлено, что формирование эклогитовых парагенезисов в будинах эклогитов и гранатовых ортопироксенитов происходило до внедрения секущих метаэндербитов и даек габброноритов.

Результаты изучения ГЭК могут быть использованы для реконструкций и моделирования геодинамических процессов в раннем докембрии и определения металлогенетической специфики на ранних этапах развития Земли.

Защищаемые положения:

1. В Гридинском комплексе Беломорской провинции формирование палеопротерозойского (1.9 млрд лет) эклогитового парагенезиса (Grt-Оmp, P=14–17 кбар, T=700–800° C) происходило в тектонических зонах по породам основного состава, слагающим дайки палеопротерозойских (2.4, 2.1 млрд лет) габброидов и будинированные тела ранних эклогитов. Палеопротерозойская эклогитизация имеет преимущественно локальный неравновесный характер: прослеживается в краевых частях геологических тел, при этом в породах часто сохраняются ранние метаморфические структуры и минеральные парагенезисы.

2. В Гридинском комплексе Беломорской провинции будинированные тела ранних эклогитов (Grt-Орх-Qz-Rt±Zo,Ky) и гранатовых ортопироксенитов (Grt-Орх-Qz) сформировались в условиях эклогитовой фации в неoarхее (~2.7 млрд лет). Неoarхейский возраст эклогитов установлен как по геологическим данным: они секутся жилами неoarхейских (2.72 и 2.68 млрд лет) гранитоидов, так и по результатам изотопного датирования метаморфогенных цирконов, содержащих минеральные включения граната и омфациита.

3. Метаморфические преобразования эндербитов, тела которых секут будины ретроградно преобразованных эклогитов и, в свою очередь, секутся неэклогитизированными дайками палеопротерозойских (2.41–2.45 млрд лет) габброноритов, фиксируют ретроградную стадию архейского метаморфизма (2.72 млрд лет) в условиях высокотемпературной гранулитовой фации (P = 11 кбар, T = 740° C).

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положены материалы, собранные автором в 2010–2019 гг., а также использованы материалы научного руководителя О.И. Володичева и сотрудников лаборатории геологии и геодинамики докембрия ИГ КарНЦ РАН А.И. Слабунова и О.С. Сибелева.

Петрографические исследования шлифов (более 500) и изучение включений в цирконах проведены методами оптической и электронной микроскопии. Для 56 образцов определения химического состава минералов производились на сканирующем микроскопе VEGA II LSH с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350 (ЦКП КарНЦ РАН, г. Петрозаводск). Термодинамические расчеты с определением P-T условий формирования минеральных парагенезисов выполнялись с использованием классических геотермометров и геобарометров (Cpx-Grt – (Powell, 1985), (Holland, 1980), Grt-Орх – (Harley, 1984a, 1984b), Hbl – (Hollister, 1987), Pl+Hbl+Qz – (Blundy, Holland, 1990), Grt+Hbl – (Wells, 1979)), методов мультитравновесной термобарометрии TWEEQU (TWQ (Berman, 1990)) и псевдосечений (Perple_X в 6.7.4 (Connolly, 2005)). Химический состав пород определялся методами силикатного химического анализа, содержания рассеянных элементов на приборе ICP-MS (ЦКП КарНЦ РАН, г. Петрозаводск).

U-Th-Pb датирование цирконов проводилось методом SIMS на ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP II в центре изотопных исследований ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского (ЦИИ ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). U-Th-Pb датирование цирконов из цоизититов и метаэндербитов проводилось методом LA-ICP-MS в Пекинском университете (Китай) на приборе ICP-MS Agilent 7500 Ce с системой лазерной абляции Complex Pro102.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах исследования – геологическом картировании ГЭК, сборе и анализе каменного материала, описании петрографических шлифов пород, микрозондовом

определении состава минералов, оценке P-T параметров метаморфизма. Автор проводил анализ минеральных включений и химического состава цирконов.

Апробация. По теме диссертации опубликовано 9 статей, в том числе, 4 – в журналах из базы Web of Science и 5 – из списка ВАК. Промежуточные результаты представлены на 28 всероссийских и международных конференциях.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 179 страницы состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 208 наименований, содержит 57 рисунков и 3 приложения.

Благодарности. Работа подготовлена в лаборатории геологии и геодинамики докембрия ИГ КарНЦ РАН. Неоценимую помощь и поддержку на всех этапах работы с диссертацией оказал научный руководитель О.И. Володичев. Автор выражает благодарность А.И. Слабунову, А.В. Степановой, О.С. Сибелеву, В.В. Балаганскому (ГИ КНЦ РАН) за важные замечания, помощь и консультации в ходе подготовки диссертации. Автор благодарен П.Я. Азимову и Д.В. Доливо-Добровольскому (ИГГД РАН) за консультации по вопросам в области метаморфизма и термодинамических расчетов. Автор искренне признателен С.А. Светову, А.В. Самсонову (ИГЕМ РАН), В.М. Козловскому (ИГЕМ РАН), Т.И. Кузенко, С.В. Егоровой, Н.С. Нестеровой, В.В. Устиновой за помощь и обсуждение материалов во время подготовки диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, цель и задачи исследования.

В первой главе дается общее представление об особенностях геологического строения, метаморфизма Фенноскандинавского щита, рассматривается проблема формирования и возраста эклогитов.

Вторая глава включает геологическое описание ГЭК детальное описание ключевых объектов исследования, в том числе, детальное описание геолого-структурных соотношений полосчатых и однородных эклогитов.

В третьей главе дается петрогеохимическая характеристика пород.

В четвертой главе приводятся результаты минералого-петрографического изучения эклогитов, гранатовых ортопироксенитов, цоизититов и метаэндербитов ГЭК.

В пятой главе рассмотрены метаморфические преобразования пород ГЭК, обосновано выделение метаморфических парагенезисов и приведены результаты расчетов температур и давлений.

В шестой главе представлены результаты геохронологического изучения пород ГЭК.

В седьмой, заключительной, главе рассмотрены P-T-t тренды метаморфических преобразований для архейских и протерозойских пород ГЭК.

Геологическое положение Гридинского эколгитсодержащего комплекса

Беломорская провинция (БП) расположена в восточной части Фенноскандинавского щита (рис. 1а) и относится к числу типичных докембрийских полиметаморфических подвижных поясов (Володичев, 1990; Глебовицкий и др., 1996; Слабунов, 2008). Она сложена преимущественно архейскими породами, преобразованными в ходе неоднократных деформаций и метаморфизма повышенных и умеренных давлений (Володичев, 1990; Бибикина и др., 1999; Слабунов, 2008). Формирование БП началось в мезозархее и завершилось в палеопротерозое (Володичев, 1990; Бибикина и др., 1999; Глебовицкий и др., 1996; Козловский и др., 2020; Слабунов и др., 2021). При этом наиболее ярко проявленными являются деформационно-метаморфические преобразования, связанные с беломорской и лапландско-кольской коллизионными орогениями, завершающими архейский и палеопротерозойский орогенические циклы развития структуры (Балаганский, 2002; Слабунов и др., 2021; Daly et al., 2006; Balagansky et al., 2015; Slabunov et al., 2017).

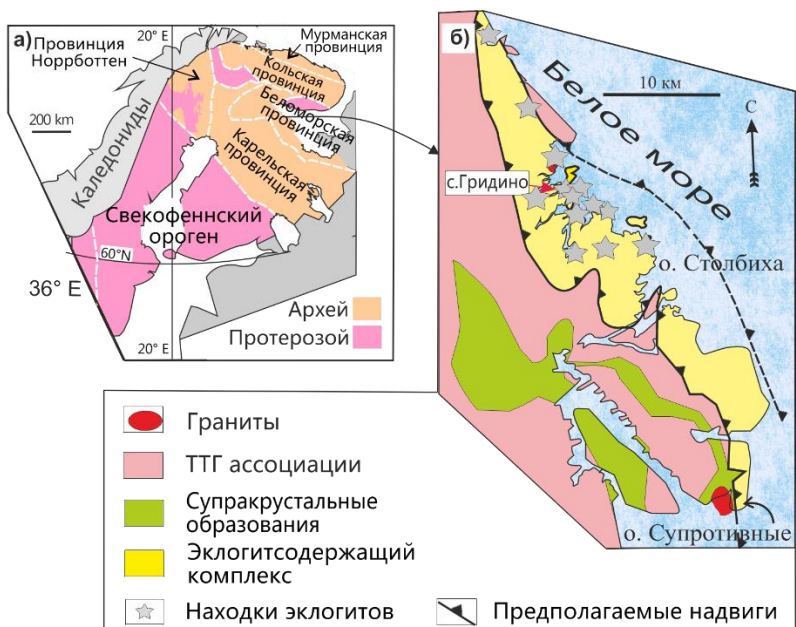


Рис. 1. Геологическое положение: а – тектоническое положение БП в восточной части Фенноскандинавского щита (Слабунов и др., 2021 с изменениями); б – схема геологического строения ГЭК (Слабунов, 2008 с изменениями).

Отличительной чертой пород БП является повсеместное проявление метаморфизма высоких и повышенных давлений амфиболитовой–гранулитовой фаций с редкими реликтами минеральных парагенезисов эклогитовой фации (Володичев, 1990; Ранний..., 2005; Слабунов и др., 2021). Известные к настоящему времени проявления эклогитов сосредоточены в трех районах БП – район с. Гридино на северо-востоке Карелии (Володичев и др., 2004; Слабунов и др., 2021 и ссылки в этой работе), устье Чупинской губы Белого моря (Козловский, Аранович, 2008) и районе Салма – Куру-Ваара на юго-западе Кольского полуострова (Минц и др., 2010). Происхождение и распространение эклогитов БП дискуссионны. Часть исследователей приводит аргументы в пользу архейского возраста эклогитового метаморфизма (Минц и др., 2010; Mints et al., 2010; Минц, Докукина, 2020; Щипанский и др., 2012а, 2012б), другие придерживаются точки зрения о палеопротерозойском возрасте эклогитов и отрицают архейский эклогитовый метаморфизм (Березин и др., 2012; Скублов и др., 2016; Скублов и др., 2011; Травин, Козлова, 2005; Козловский и др., 2020; Melnik et al., 2021; Imayama et al., 2017; Yu et al., 2017). Альтернативная точка зрения предполагает возможность двукратного проявления эклогитового метаморфизма – в архее и в палеопротерозое (Володичев и др., 2004, 2012; Слабунов, 2008; Слабунов и др., 2011, 2021; Babarina, Sibelev, 2015; Balagansky et al., 2015, 2019; Li et al., 2015; Volodichev et al., 2022).

Гридинский эклогитсодержащий комплекс (ГЭК) располагается в восточной части БП и слагает структуру, которая прослеживается в северо-западном направлении в прибрежной полосе и на островах Белого моря примерно на 50 км при ширине 6–7 км (рис. 1б). ГЭК рассматривается как смесь матрикса, представленного мигматизированными тоналит-грондьемит-гранодиоритовыми (ТТГ) гнейсами, метаэндербитами и заключенными в них многочисленными будинированными телами амфиболитов, эклогитов, пироксенитов, цоизитов и метаморфизованных габброидов (Слабунов и др., 2007; Слабунов, 2008; Babarina, Sibelev, 2015). Зоны, насыщенные будинами (до 30% от общего объема пород ГЭК), имеют северо-западное простирание и сменяются областями с относительно низкой их концентрацией (рис. 2). Матрикс и будинированные тела ГЭК секутся рядами палеопротерозойских мафических даек (Степанов, 1990; Степанов, Степанова, 2006), которые являются важным геологическим репером. Наиболее распространенными в ГЭК являются дайки оливиновых габброноритов (2.41–2.45 млрд лет) и гранатсодержащих метагаббро (2.12 млрд лет) (Stepanova et al., 2022). Геологоструктурные исследования указывают на три главных этапа деформаций в ГЭК: преддайковый, синмагматический и постдайковый (Babarina, Sibelev, 2015). Постдайковый этап преобразований, фиксируемый в деформированных и будинированных дайках, сопровождается метаморфизмом от амфиболитовой до эклогитовой фации (Володичев, 1990; Володичев и др., 2004; Березин и др., 2012; Степанов, Степанова, 2006; Слабунов и др., 2011; Травин, Козлова, 2005; Perchuk, Morgunova, 2012). Зоны эклогитизации (от нескольких сантиметров до

нескольких метров) приурочены к краевым частям даек. Отсутствие эклогитовых парагенезисов во вмещающих комплексах обусловило развитие гипотезы «автоклавного» эклогитового метаморфизма за счет высокого флюидного давления при кристаллизации магматического расплава в замкнутой системе дайкового тела (Володичев и др., 2005). Другая гипотеза связывает эклогитизацию и высокобарный метаморфизм в габброидах с более поздними – палеопротерозойскими структурами – зонами пластических деформаций (Травин и др., 2006; Козловский и др., 2020).

Несмотря на большую площадь распространения пород ГЭК (рис. 1б, 2), работы предшественников были сосредоточены на нескольких ключевых объектах, среди которых будина на о. Столбиха, сложенная преобразованными эклогитами, и несколько даек палеопротерозойского возраста в районе с. Гридино, сохранившие признаки высокобарного метаморфизма (Володичев и др., 2004; Травин, Козлова, 2005; Травин, 2015; Слабунов и др., 2011; Dokukina et al., 2014).

Среди изученных в ГЭК объектов (рис. 2) наиболее перспективными для восстановления истории метаморфических преобразований являются о. Столбиха и участок Самылино, где крупные будины базитов менее затронуты амфиболитизацией и содержат участки пород с эклогитовым парагенезисом.

Крупная будина (рис. 3а) в южной части о. Столбиха является классическим объектом изучения эклогитов в БП. Будина о. Столбиха имеет сложное строение (рис. 3а, б): 1) амфиболиты ($\pm \text{Grt}$) развиты по периферии тела и вдоль контактов секущей пегматитовой жилы; 2) однородные или слабо деформированные эклогиты слагают восточную и северную части будины (обр. СТ-2); 3) полосчатые, смятые в складки, преобразованные эклогиты составляют основную часть будины (обр. СТ-1).

В ранних исследованиях (Володичев и др., 2004; Скублов и др., 2011) однородные эклогиты описаны как реликтовые, сохранившие Grt и Omp . Полосчатые преобразованные эклогиты (обр. СТ-1) рассматривались, как результат ретроградного метаморфизма реликтовых однородных эклогитов (Li et al., 2015). Полученные ранее результаты U-Th-Pb изучения циркона из эклогитов этой будины противоречивы и свидетельствуют о палеопротерозойском (~ 1.9 млрд лет (Скублов и др., 2011; Хервартц и др., 2012; Yu et al., 2017)) или архейском (~ 2.7 млрд лет (Володичев и др., 2004; Li et al., 2015)) возрасте метаморфизма. Обе точки зрения имеют геохронологическое и петрологическое обоснование, но оставляют вопрос о возрасте и метаморфической эволюции беломорских эклогитов открытым.

Будина участка Самылино имеет простое строение: ее краевые части амфиболитизированы, а центр сложен массивными эклогитами, которые секутся тонкими жилами кислого состава.

Пироксениты представлены отдельными будинами или их скоплениями в виде линейных зон (о. Избная Луда, о. Воротная Луда, м. Гридин, о. Крестовый, о. Высокий, о. Прянишная Луда (рис. 4а)). Для метапироксенитов о. Высокий отмечаются высокие P-T параметры ($P = 17$ кбар, $T = 690^\circ \text{C}$) формирования в

области эклогитовой фации (Моргунова, Перчук, 2012; Сердюк, 2013). Это является важным свидетельством проявления высокобарического метаморфизма не только в эклогитах, но и в других компонентах ГЭК.

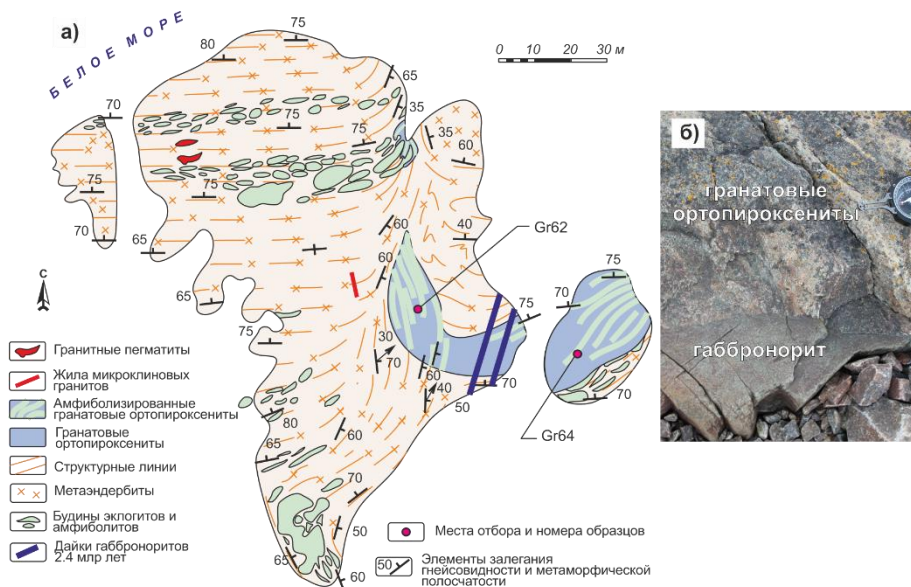


Рис. 4. Остров Прянишная Луда: а – карта геологического строения острова; б – будинированные тела гранатовых ортопироксенитов и жильные метаэндербиты секутся дайкой габброноритов 2.41–2.45 млрд лет.

Гранатовые ортопироксениты изучены на о.Прянишная луда (рис. 2, 4), где в восточной части острова крупное (75x25 м) тело залегает среди метаэндербитов и занимает геологическое положение, близкое к будинам эклогитов в южной и северной частях острова (рис. 4а). Жильные метаэндербиты секут будины эклогитов и гранатовых ортопироксенитов. Сложное внутреннее строение гранатовых ортопироксенитов обусловлено дезинтеграцией пород под влиянием мигматизации и внедрением жил эндербитов. Гранатовые ортопироксениты и метаэндербиты секутся дайками габброноритов (2.41–2.45 млрд лет) северо-восточного простирания (рис. 4б). Эклогитовый парагенезис в габброноритах отсутствует, а формирование гранатовых ортопироксенитов по геологическим признакам происходило в архее до внедрения эндербитов и даек габброноритов.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. В Гридинском комплексе Беломорской провинции формирование палеопротерозойского (1.9 млрд лет) эклогитового парагенезиса (Grt-Omp, $P=14-17$ кбар, $T=700-800^{\circ}$ C) происходило в тектонических зонах по породам основного состава, слагающим дайки палеопротерозойских (2.4, 2.1 млрд лет) габброидов и будинированные тела ранних эклогитов. Палеопротерозойская эклогитизация имеет преимущественно локальный неравновесный характер: прослеживается в краевых частях геологических тел, при этом в породах часто сохраняются ранние метаморфические структуры и минеральные парагенезисы.

Палеопротерозойский эклогитовый метаморфизм проявлен и в дайках базитов, и в будинированных телах. Многие дайки содержат Di-Pl симплектиты, указывающие на высокобарный метаморфизм и последующую декомпрессию, но лишь единичные маломощные тела эклогитизированы полностью (Perchuk, Morgunova, 2012). В большинстве случаев эклогитизированы только отдельные зоны в пределах дайки, сохраняются первичные структуры и реликты ранних метаморфических или магматических минеральных парагенезисов (Степанов, Степанова, 2006; Травин, 2015; Слабунов и др., 2011; Володичев и др., 2012). Постэклогитовые метаморфические изменения в дайках связаны с их эксгумацией. Ретроградный P-T тренд содержит эпизод нагрева в условиях гранулитовой фации (~12 кбар и ~ 800° C) во время декомпрессии, за которым следует изобарное охлаждение в условиях амфиболитовой фации (Perchuk, Morgunova, 2012).

В будинированных базитовых телах ГЭК палеопротерозойский эклогитовый метаморфизм зафиксирован на о.Столбиха. Здесь датированы эклогиты двух групп: полосчатые преобразованные эклогиты и однородные эклогиты. U-Th-Pb возраст метаморфических цирконов из однородных эклогитов, отобранных из восточной части тела (рис. 3а), составляет около 1.9 млрд лет. Полученные значения возраста согласуются с результатами предшествовавших U-Th-Pb исследований циркона из однородных эклогитов (Скублов и др., 2011; Yu et al., 2017) и Lu-Hf определений граната (Хервартц и др., 2012).

На о.Столбиха однородные эклогиты локализованы в краевой части будины и характеризуются контрастной зоной перехода от однородных к полосчатым породам (рис. 3, 5а, б). Главное палеопротерозойское метаморфическое событие в этих породах связано с формированием Grt-Omp минерального парагенезиса.

В однородных эклогитах клинопироксен по морфологическим признакам и составу разделяется на несколько групп. Первая разновидность представлена включениями (до 0.5 мм) омфацита (23–33% Jd) в гранате. Вторая – крупные (до 4 мм) зональные кристаллы омфацита (центр – Jd до 35%, край – Jd 18–6%) с каймой из Di-Pl(\pm Amp) симплектитов.

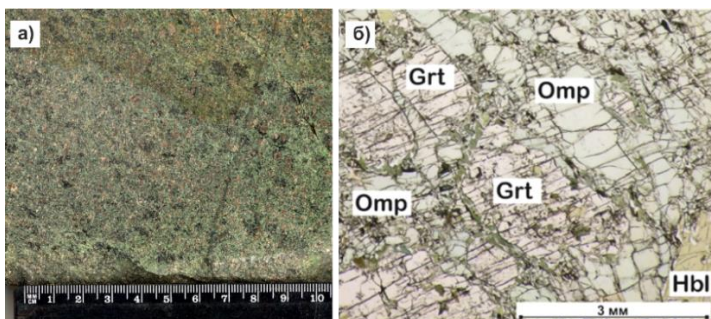


Рис. 5. Однородные эклогиты о.Столбихи: а – полированный срез; б – соотношение Grt и Omp (фото в проходящем свете).

Гранаты однородных эклогитов о.Столбихи имеют сложное зональное строение, которое проявляется в изменении набора минеральных включений и химического состава от центра зерна к краю: 1) центральная часть – однородная, либо с мелкими включениями Zo, Ky, Qz, Rt и Cal – ранняя минеральная ассоциация; 2) промежуточная часть с включениями Omp; 3) краевая зона с редкими включениями Di, Amp, Pl.

Крупные кристаллы Omp и парагенетичный Grt, а также включения Omp в промежуточной части Grt формировались при $P = 14\text{--}17$ кбар и $T = 700\text{--}820^\circ\text{C}$, что подтверждается и более ранними исследованиями (Li et al., 2015; Yu et al., 2017). Последующие стадии метаморфизма пород отражают ретроградные изменения с образованием Di-Pl симплектитов, Grt и Amp в условиях высокобарной гранулитовой и амфиболитовой фаций ($P = 12\text{--}15$ кбар, $T = 750\text{--}850^\circ\text{C}$). Наиболее поздние преобразования проявлены вблизи контакта с вмещающими гнейсами, где происходит амфиболитизация эклогитов при $P = 8\text{--}11$ кбар и $T = 600\text{--}650^\circ\text{C}$.

Совокупность имеющихся данных позволяет рассматривать однородные эклогиты Столбихи, как поздние (палеопротерзойские) эклогиты. Полосчатые эклогиты имеют архейский возраст метаморфизма и будут рассмотрены во втором защищаемом положении.

На участке Самылино будина эклогитов не имеет макроскопических признаков неоднократных преобразований. Эклогитовый парагенезис хорошо сохранился и представлен Grt-Omp-Qz-Rt парагенезисом, сформированным при $P = 15\text{--}16$ кбар и $T = 750\text{--}800^\circ\text{C}$ (рис. 6). U-Th-Pb возраст метаморфизма в эклогитах Самылино фиксируется по группе цирконов, обладающих морфологией и внутренним строением типичным для метаморфических цирконов со средневзвешенным возрастом 1900 ± 36 млн лет. Включения Grt и Omp в цирконе указывают на его кристаллизацию в ходе эклогитового метаморфизма (Максимов и др., 2022).

Несмотря на отсутствие в эклогитах участка Самылино реликтов ранних текстур, породы частично сохранили реликтовые минеральные парагенезисы, представленные включениями Di_{вкл}-Pl симплектитов, Hbl и Qz в центральной

части зерен граната. Структурное положение этих включений и их состав свидетельствуют о том, что они не были в равновесии с более поздним Grt-Omp парагенезисом и отражают ранние стадии преобразования пород.

Эффективный состав (в мас. %): $\text{SiO}_2=47.78$, $\text{TiO}_2=0.81$, $\text{Al}_2\text{O}_3=14.68$, $\text{FeO}=1.70$, $\text{FeO}=11.06$, $\text{MnO}=0.26$, $\text{MgO}=9.11$, $\text{CaO}=11.02$, $\text{Na}_2\text{O}=2.76$

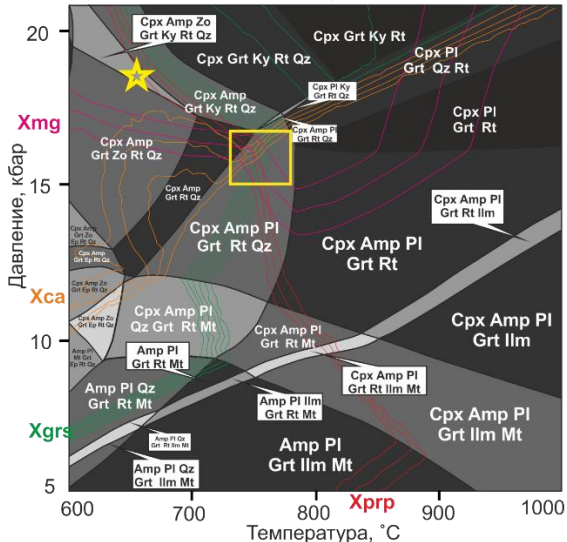


Рис. 6. *P–T псевдосекция в системе NCTiFMnASHO для эцлогита участка Самылино. Цветные линии – изоплеты составов Grt и Cpx. Желтый квадрат – пересечение изоплет Grt и Cpx, желтая звезда – ранний Grt-Cpx-Ky-Rt-Qz парагенезис в центральной части граната.*

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что поздний палеопротерозойский (около 1.9 млрд лет) этап эцлогитового метаморфизма в ГЭК происходил при $P = 14–17$ кбар и $T = 700–820^\circ \text{C}$, что фиксируется в будинах эцлогитов на участках Столбиха и Самылино. Этот же метаморфизм установлен и в дайках базитов, эцлогитизация которых происходила при $P = 18–30$ кбар и $T = 660–860^\circ \text{C}$ (Слабунов и др., 2011; Березин и др., 2012; Perchuk, Morgunova, 2012).

2. В Грядинском комплексе Беломорской провинции будинированные тела ранних эцлогитов (Grt-Omp-Qz-Rt±Zo,Ky) и гранатовых ортопироксенитов (Grt-Orx-Qz) сформировались в условиях эцлогитовой фации в неоархее (~2.7 млрд лет). Неоархейский возраст эцлогитов установлен как по геологическим данным: они секутся жилами неоархейских (2.72 и 2.68 млрд лет) гранитоидов, так и по результатам изотопного датирования метаморфогенных цирконов, содержащих минеральные включения граната и омфацита.

Детальное изучение реликтовых минеральных парагенезисов проведено в эцлогитах участка Самылино, однородных и полосчатых эцлогитах о.Столбиха, а также в гранатовых ортопироксенитах о.Прянишная Луда.

В эклогитах Самылино реликтовые минеральные парагенезисы представлены особым морфотипом $Di_{вкл}-Pl$ симплектитов в виде включений в центральных частях кристаллов *Omp* и *Grt*. В омфаците включения $Di_{вкл}-Pl$ симплектитов (4–16% *Jd*, 23–30% *An*) располагаются в центральной части крупных монокристаллов (рис. 7а, б). Эти ранние включения имеют резкий контакт с *Omp*-контейнером, сопровождающийся ростом содержания жадеитового минала в клинопироксене на 10–20%. Образование поздних симплектитов по омфациту в основной массе породы (рис. 7в) происходит с плавным снижением содержания жадеита без резких переходов, поэтому обнаруженные $Di_{вкл}-Pl$ включения симплектитов не могли формироваться по омфациту-контейнеру.

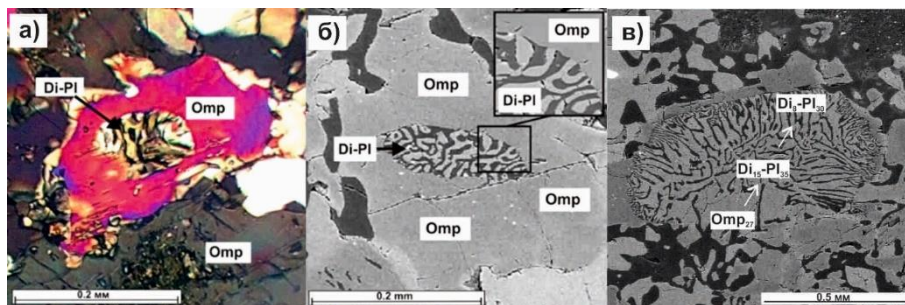


Рис. 7. Однородные эклогиты: а, б – включения $Di-Pl$ симплектитов в монокристаллах *Omp*; в – обрастание *Omp* диопсид-плагиоклазовыми симплектитами (изображения с анализатором и BSE, здесь и далее индексы у *Omp* и *Di* обозначают содержание жадеита, у *Pl* – анортита).

Зональные зерна граната в центральной части содержат включения ранних $Di_{вкл}-Pl$ симплектитов (рис. 8а), местами с *Hbl* и *Qz*. Более поздняя, промежуточная, зона граната насыщена крупными (до 0.2 мм) включениями Omp_2 (32–36% *Jd*). Краевая зона (узкие 50–200 мкм внешние части) граната содержит редкие включения *Di*, *Hbl* и *Pl*. Изменение химического состава граната коррелирует с характером минеральных включений (рис. 8б). Максимальное количество пироба 27–30% прослеживается в промежуточной части зерна, а для центральной и краевой части – отмечается его снижение 20–25%.

Наиболее ранний минеральный парагенезис $Grt-(Di_{вкл}-Pl)-Hbl-Qz$, обнаруженный в центральной части граната эклогитов Самылино, сформировался при $P = 12-14.5$ кбар и $T = 700-760^\circ C$ в переходной области эклогитовой и высокобарной гранулитовой фаций. На следующем этапе метаморфизма формируется поздний омфацит в промежуточной части граната и матрице породы в условиях эклогитовой фации.

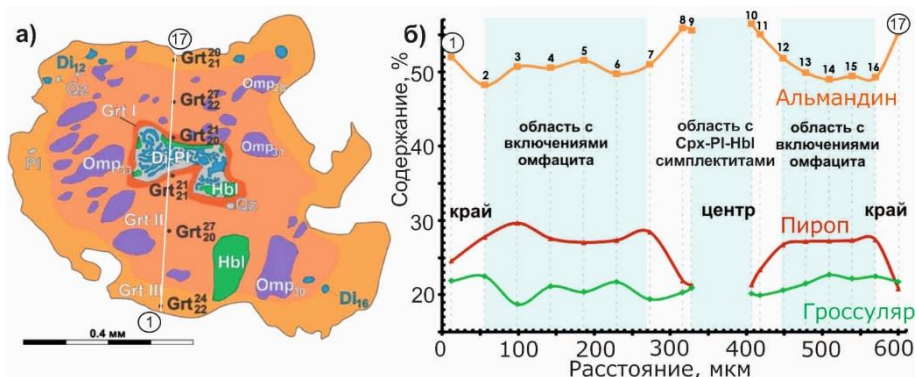


Рис. 8. Зональный гранат и вариации его химического состава по профилю 1–17 (индексы у граната: верхнее – содержание пирропа, нижнее – гроссуляра).

U-Th-Pb возраст метаморфических цирконов из эклогитов участка Самылино составляет 2.56–2.72 млрд лет (рис. 9а, б, в). Он установлен по группе метаморфических цирконов округлой формы с низкими Th/U отношениями (<0.1–0.2). Цирконы содержат единичные включения Zo и Qz (рис. 9а). Эти данные свидетельствуют в пользу неoarхейского высокобарного (эклогитового) метаморфизма в ГЭК (Максимов и др., 2022).

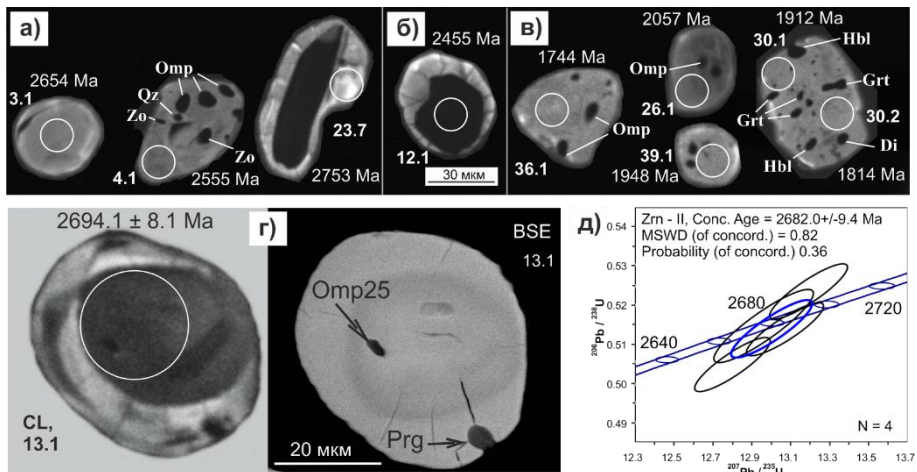


Рис. 9. а, б, в – изображения датированных цирконов в катодолюминесценции (CL) из эклогитов Самылино; г – изображения датированных цирконов в CL и BSE из однородных эклогитов Столбихи; д – U-Pb диаграмма с конкордией для архейской группы цирконов Столбихи.

В эклогитах о.Столбиха реликтовые минеральные парагенезисы представлены как в однородных эклогитах – в виде включений $D_{i\text{вкл}}-Pl$ в омфаците, омфацита и граната в цирконе (рис. 9г, д), так и в полосчатых эклогитах (рис. 9а) – включениями омфацита в гранате (рис. 9б). Реликтовые парагенезисы не могли быть сформированы в ходе того же этапа метаморфизма, что и Grt-Omp парагенезис палеопротерозойского метаморфизма, преобладающий в матриксе однородных эклогитов. Об этом свидетельствует структурное положение ранних включений $D_{i\text{вкл}}-Pl$ симплектитов в центре монокристаллов омфацита и архейский возраст метаморфических цирконов с включениями Grt и Omp (рис. 9в).

В полосчатых эклогитах обнаружены реликты раннего Omp-Qz-Rt парагенезиса в виде включений в гранате (рис. 10а, б). На высокобарный метаморфизм указывают и Di-Pl симплектиты, вероятно, сформированные по Omp (24 % Jd)(рис. 10в). Grt-Omp-Qz-Rt парагенезис образовался при $P = 14$ кбар и $T = 750^\circ C$. Такие термобарометрические данные сопоставимы с результатами P-T расчетов методом псевдосекций ($P = 13-14$ кбар, $T = 710-740^\circ C$) для полосчатых эклогитов о.Столбиха. Более поздние преобразования полосчатых эклогитов происходили с образованием Grt-Cpx-Hbl-Vt-Pl-Qz (рис. 10а) при снижении давления до 11 кбар и увеличении температуры до $900^\circ C$ в условиях гранулитовой фации.

Условия высокобарных преобразований раннего этапа несколько отличались от P-T параметров формирования однородных протерозойских эклогитов, варьируя от эклогитовой до высокобарной гранулитовой фации метаморфизма при P не более 14 кбар. Реликтовый характер парагенезисов не позволяет оценить максимальные P-T условия раннего этапа преобразования пород в области эклогитовой фации, но анализ петрологических данных фиксирует высокобарный гранулитовый этап с образованием симплектитов, которые могли формироваться по ранним эклогитам.

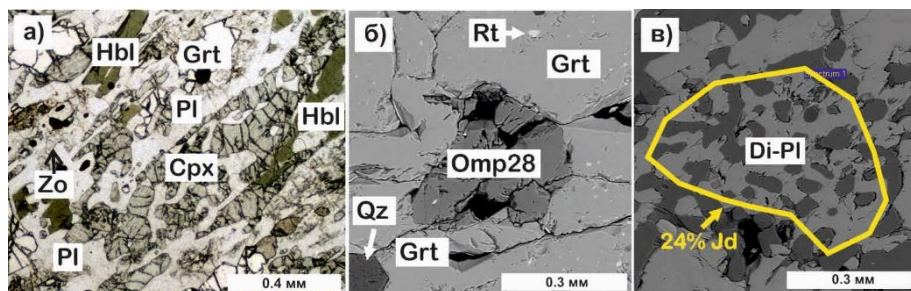


Рис. 10. Полосчатые эклогиты о.Столбиха: а – ориентированные Di-Pl симплектиты (микрофото в проходящем свете); б – включения Omp, Rt и Qz в гранате; в – оценка химического состава Di-Pl симплектитов (BSE).

U-Th-Pb возраст метаморфических цирконов и парагенетичных им Grt и Omp установлен по полосчатым и однородным эклогитам Столбихи (рис. 9г, д). Метаморфический циркон из полосчатых эклогитов имеет только архейский возраст около 2.7 млрд лет. Близкие оценки возраста эклогитового метаморфизма получены по одной из групп цирконов из однородных эклогитов (рис. 9г, д). Наличие в этих цирконах включений граната (Li et al., 2015) и омфациита (Volodichev et al., 2021) доказывают, что его кристаллизация проходила в условиях стабильности Grt-Omp парагенезиса, а архейский возраст циркона (Volodichev et al., 2021) подтверждает полученные ранее данные (Володичев, 2004; Li, 2015) и свидетельствует об архейском возрасте раннего высокобарного метаморфизма в ГЭК.

Гранатовые ортопироксениты

Результаты геологического изучения положения будины гранатовых ортопироксенитов на о.Прянишная Луда показывают, что формирование гранатсодержащих высокобарных парагенезисов в этих породах, а также их мигматизация происходили до внедрения дайки габброноритов, т.е., до 2.45 млрд лет. Отсутствие в габброноритах дайки эклогитовых парагенезисов свидетельствует о том, что в палеопротерозое в этой части ГЭК условия метаморфизма не достигали эклогитовой фации.

Петрологические исследования основываются на детальном изучении гранатовых ортопироксенитов, крупные зональные зерна ортопироксена и граната в которых несут основную информацию о метаморфических преобразованиях пород. Зерна ортопироксена (до 5 мм) и граната (до 1.5 мм) имеют неправильную форму и содержат в краевых частях включения Hbl, Qz и Pl. В гранате (40–47% Alm, 30–38% Prp, 10–14% Grs) в центральной части присутствуют включения Qz, в краевой части – Орх, Di и Hbl. Ортопироксен представлен энстатитом со слабо выраженной химической зональностью. Плагиоклаз (25–30% An) встречается в качестве включений в Орх и Grt, но чаще образует самостоятельные зерна.

В гранатовых ортопироксенитах сохранилась информация лишь о ретроградном этапе метаморфизма. Формирование Grt-Орх-Qz парагенезисов происходило на ранних стадиях метаморфизма и отражает их пиковые условия при $P = 24$ кбар и $T = 800^\circ \text{C}$. Ретроградные изменения отвечают гранулитовой ($P = 15$ кбар и $T = 700^\circ \text{C}$) и амфиболитовой ($P = 8$ кбар, $T = 600^\circ \text{C}$) фациям метаморфизма.

Полученные данные согласуются с результатами ранних работ (Моргунова, Перчук, 2012) и свидетельствуют о том, что в ГЭК формирование гранатовых ортопироксенитов происходило в области эклогитовой фации метаморфизма с последующим ретроградным преобразованием. Особенности геологического положения ортопироксенитов свидетельствуют о том, что их метаморфические преобразования происходили до 2.45 млрд лет.

Таким образом, результаты изучения реликтовых минеральных парагенезисов в будинах эклогитов и гранатовых ортопироксенитов ГЭК показали, что на ранних стадиях метаморфической эволюции условия

метаморфизма достигали эклогитовой фации. Возраст ранних этапов метаморфических преобразований фиксируется по возрасту циркона в полосчатых эклогитах о. Столбиха (2.7 млрд лет) и возрасту раннего кластера метаморфических цирконов Самылино (2.56–2.72 млрд лет), что свидетельствует о существовании неархейского этапа эклогитового метаморфизма в ГЭК.

3. Метаморфические преобразования эндербитов, тела которых секут будины ретроградно преобразованных эклогитов и, в свою очередь, секутся неэклогитизированными дайками палеопротерозойских (2.41–2.45 млрд лет) габброноритов, фиксируют ретроградную стадию архейского метаморфизма (2.72 млрд лет) в условиях высокобарной гранулитовой фации ($P = 11$ кбар, $T = 740^\circ C$).

Метаэндербиты типичны для ГЭК, их анализ позволяет выделить три генерации эндербитов или их преобразованных разновидностей (метаэндербитов): 1) мелкозернистые массивы метаэндербитов до 1 км, 2) среднезернистые и 3) крупнозернистые жилы, которые секут будинированные тела эклогитов, пироксенитов и амфиболитов. Метаэндербиты секутся неэклогитизированными дайками палеопротерозойских габброноритов. Главная текстурная особенность метаэндербитов – наличие коронитовых сростаний (рис. 11а), сложенных преимущественно Amp, Pl, Qz, Grt и Opx, который сохраняется в редких случаях.

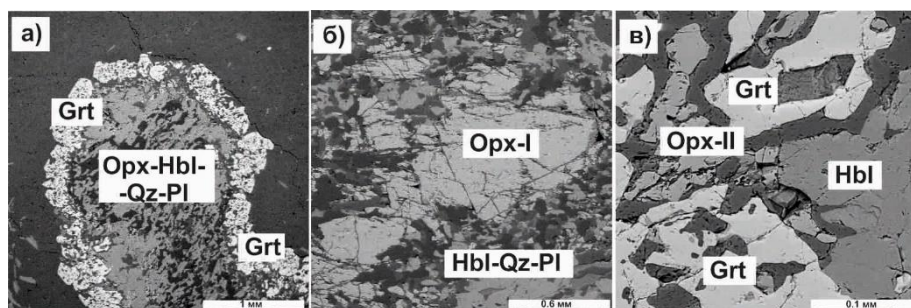


Рис. 11. Метаэндербиты: а – коронитовая структура с Opx-Qz-Pl-Grt-Hbl минеральной ассоциацией; б – ранний Opx-I в центре; в – метаморфический Opx-II в краевой зоне (BSE).

Обнаружены две генерации ортопироксена. Opx-I представлен крупными зернами в центральной части (рис. 11б) коронитовых структур и может соответствовать магматическому этапу становления пород. Opx-II формирует более мелкие зерна (рис. 11в), приуроченные к внутренней границе гранатовых «корон». Зерна Opx-II парагенетичны с кристаллами Grt (35–47% Alm, 30–36% Prp, 15–23% Grs), Pl, Amp и Bt.

P-T условия второй генерации ортопироксена и паргенетичных Grt, Pl, Qz и Bt соответствуют высокобарной амфиболитовой фации при $P = 11$ кбар и $T = 740^\circ$ C. Поздние ретроградные изменения происходили в условиях амфиболитовой фации при $P = 8$ кбар и $T = 630^\circ$ C и рассчитаны по Grt-Hbl-Pl-Qz минеральной ассоциации. Ретроградный тренд метаморфических преобразований метаэндербитов хорошо коррелируется с ретроградными этапами преобразования ранних эклогитов.

Результаты U-Th-Pb датирования цирконов из метаэндербитов показали две возрастные группы: 2825 ± 22 и 2722 ± 17 млн лет (рис. 12а). К цирконам первой группы (Zrn_1) относятся удлиненные призматические зерна с осцилляторной зональностью, включениями Ap, Qz и Pl в центральной части зерен, $Th/U = 0.07-0.62$, относительно высокими содержаниями PЗЭ с отрицательным Eu пиком и повышенными значениями тяжелых PЗЭ (рис. 12б). Такие характеристики свидетельствуют скорее о магматогенной природе этой группы цирконов и возрасте протолита. Цирконы поздней генерации (Zrn_2) с возрастом 2722 ± 17 млн лет представлены каймами обрастания с низкими Th/U значениями ($0.04-0.07$) и обедненными тяжелыми PЗЭ (рис. 12а, б), что позволяет синхронизировать их образование с поздними фазами становления метаэндербитов – с формированием гранатовых коронитовых структур.

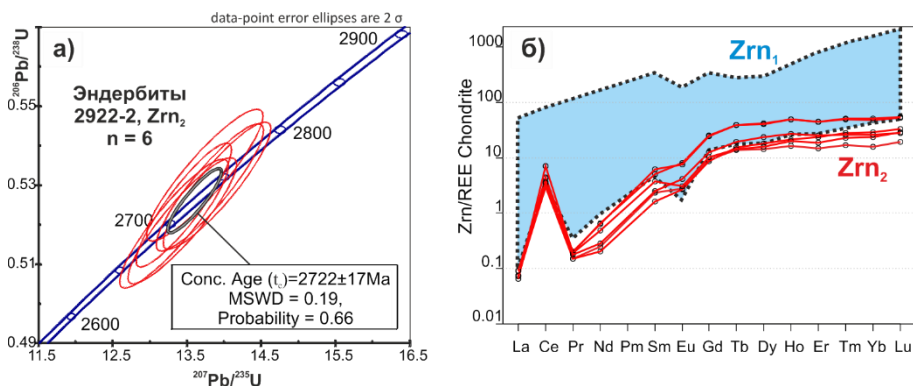


Рис. 12. Метаэндербиты: а – U-Pb диаграмма с конкордией для метаморфической группы цирконов Zrn_2 ; б – спектры распределения PЗЭ в датированных зернах циркона.

Высокобарные парагенезисы и соответствующие им метаморфические цирконы архейского возраста в эндербитах указывают на преобразования пород ГЭК в условиях высокобарного гранулитового метаморфизма в архейское время (около 2.72 млрд лет), что перекрывается со временем формирования ранних эклогитов около 2.7 млрд лет. Однако текущее положение эндербитов относительно ранних эклогитов указывает на их более поздний возраст. Полученные данные предполагают достаточно быстрый переход от эклогитовой к гранулитовой фации в архейское время, с формированием

эндербитового расплава в декомпрессионных условиях ретроградного метаморфизма, соответствующего полю стабильности ортопироксена ($P = 11$ кбар и $T = 740^\circ \text{C}$).

Результаты термобарометрических расчетов и их сопоставление с результатами U-Th-Pb изучения цирконов позволяют получить P-T-t тренды метаморфических преобразований для пород ГЭК (рис. 13). Все P-T-t тренды характеризуются движением «по часовой стрелке», что типично для орогенного (коллизийного) и субдукционного метаморфизма (Лиханов, 2020). Наиболее раннему (около 2.7 млрд лет) этапу метаморфизма соответствуют формирование эклогитов и гранатовых ортопироксенитов. Дальнейшие преобразования пород связываются с высокобарным гранулитовым метаморфизмом в ходе декомпрессии пород и образованием секущих архейских (2.7–2.68 млрд лет) эндербитов и гранитоидных жил. В палеопротерозое (2.41–2.45 млрд лет) комплекс секут дайки габброноритов. Около 1.9 млрд лет происходит поздняя эклогитизация будин и даек габброноритов. На завершающем этапе гранулитового метаморфизма внедряются пегматитовые жилы (около 1.88 млрд лет).

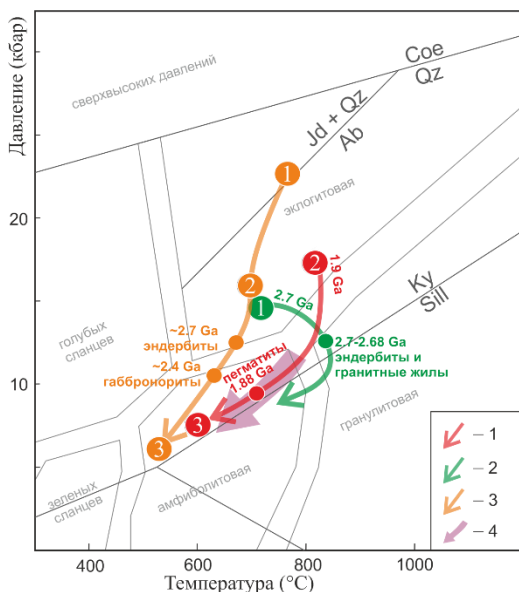


Рис. 13. P-T-t тренды метаморфической истории формирования пород ГЭК на P-T диаграмме (Bucher, Grapes, 2011 с изменениями):
 1 – однородные эклогиты,
 2 – полосчатые эклогиты,
 3 – гранатовые ортопироксениты,
 4 – метаэндербиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили рассмотреть архейскую и палеопротерозойскую историю метаморфических преобразований в полиметаморфическом ГЭК БП. Термобарометрические расчеты и геохронологические данные получены для реликтовых минеральных

парагенезисов в эклогитах и гранатовых ортопироксенитах указывают на их формирование в эклогитовой фации, для метаэндербитов – в области высокобарной гранулитовой фации. P-T-t тренд архейских метаморфических преобразований соответствует движению «по часовой стрелке». В эклогитах и гранатовых ортопироксенитах ГЭК надежно фиксируется ранний архейский (2.7 млрд лет) эклогитовый метаморфизм. Это, в первую очередь, касается эклогитов, для которых установлено: 1) секущее положение гранитоидных жил с возрастом 2.68 млрд лет; 2) включения Di–Pl симплектитов в Omp, минеральная (включения) и химическая зональность в гранатах; 3) цирконы с включениями Grt-Omp и возрастом 2.7 млрд лет. Метаэндербиты формировались в архее на поздней стадии эклогитового и начале гранулитового метаморфизма. Архейский высокобарный метаморфизм охватывает всю площадь ГЭК и не затрагивает более поздние дайки габброноритов и пегматитовые жилы.

Палеопротерозойский метаморфизм в породах ГЭК проявлен неравномерно. Выделяются участки интенсивной палеопротерозойской переработки, где следы архейского метаморфизма практически отсутствуют. Эклогитизация пород в это время носила ограниченный локальный характер, возможно связанный с привнесом флюида и метаморфизмом по типу каледонских эклогитов Норвегии.

Результаты локального изотопного датирования циркона подтверждают сложную полиэтапную историю становления эклогитов и сопряженных с ними пород с пиками эклогитового метаморфизма в периоды около 2.7 и 1.9 млрд лет. Эти пики согласуются с проявлениями в регионе двух главных орогений: мезо-неоархейской – беломорской и палеопротерозойской – лапландско-кольской (Балаганский, 2002; Слабунов и др., 2021).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Максимов О.А. Метаморфическая эволюция пироксенитов Гридинского эклогитсодержащего комплекса (остров Прянишная луда) // Вестник МГТУ, Мурманск. 2014. Т. 17. № 2. С. 320–328.

Слабунов А.И., Володичев О.И., Ли Сяоли, **Максимов О.А.** Архейские цоизититы Гридинского эклогитсодержащего меланжа (Беломорская провинция Фенноскандинавского щита): геология, U-Pb возрасты цирконов и геодинамические следствия // Труды Карельского научного центра РАН. № 7. 2015. С. 85–105.

Максимов О.А. Геолого-петрологические особенности эклогитов на участке Самылино (Беломорская провинция Фенноскандинавского щита) // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 2. С. 88–94.

Володичев О.И., Кузенко Т.И., **Максимов О.А.** Петрология цоизититовых пород Гридинского эклогитсодержащего комплекса Беломорской провинции

Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. №10. С. 26–48.

Volodichev O.I.; **Maksimov O.A.**; Kuzenko T.I.; Slabunov A.I. Archean Zircons with Omphacite Inclusions from Eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The First Finding. Minerals. 2021. 11. 1029.

Максимов О.А., Балаганский В.В., Слабунов А.И., Ларионов А.Н. Два этапа высокobarного метаморфизма в раннедокембрийских эклогитах (район Гридино Беломорской провинции Фенноскандинавского щита): петрология и геохронология // Петрология. 2022. №2. С. 140–165.

Устинова В.В., **Максимов О.А.**, Егорова С.В. Метабазиты Келейногубского массива Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита: состав, строение и условия метаморфизма // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 3. С. 25–37.

Stepanova A.V. Stepanov V.S., Larionov A.N., Salnikova E.B., Samsonov A.V., Azimov P., Egorova S.V., Larionova Y.O., Sukhanova M.A., Kervinen A.V., **Maksimov O.A.** Relicts of Palaeoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen // Spec. Publ. 2021. № 518.

Сибелев О.С., Гоголев М.А., **Максимов О.А.** Геологическая позиция и условия формирования метаэндербитов Гридинской зоны эклогитсодержащего меланжа (Беломорский подвижный пояс) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2013. 16. С. 5–20.

Максимов О.А., Балаганский В.В., Слабунов А.И. Геология, петрология и геохронология эклогитов Гридинского комплекса (участок Самылино, Беломорская провинция) // Петрология и геодинамика геологических процессов. Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых). Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, 2021. Том. 2. С.132–135.

Maksimov O.A., Slabunov A.I., Balagansky V.V., Volodichev O.I. Archean eclogites from the Belomorian Province (examples from the Gridino area) // Abstract Volume of the 13th International Eclogite Conference / C. Mattinson, D. Castelli, S.W. Faryad, J. Gilotti, G. Godard, A. Perchuk, D. Rubatto, H.-P. Schertl, T. Tsujimori, Y.-F. Zheng (Eds.). Petrozavodsk: KRC RAS. 2019. P.54.

Maksimov O.A., Volodichev O.I. Two stages of Archaean eclogite-facies metamorphism in the Belomorian mobile belt, Fennoscandian Shield, Gridino structure // Moscow International School of Earth Sciences – 2016. Abstracts of International conference. M.: GEOKHI RAS. 2016. P. 76–78.

Volodichev O.I., Slabunov A.I., Li Xiaoli, **Maksimov O.A.** Archean eclogites and zoisitites of the Gridino eclogite-bearing complexes: geology, petrology and geochronology // Precambrian high-grade mobile belts. Extended Abstracts. Petrozavodsk: KRC RAS. 2014. 117–120.

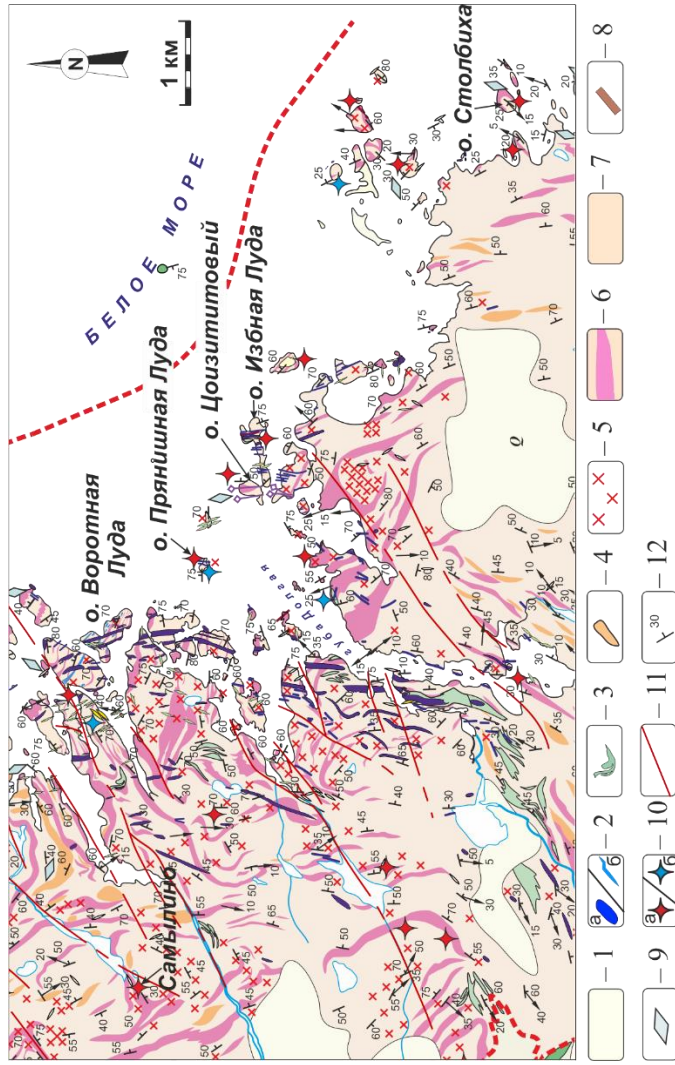


Рис. 2. Схема геологического строения центральной части Гридинского комплекса (составлена О.С. Сибелевым, с использованием геологических материалов И.И. Бабариной, О.И. Володичева, О.А. Максимова и др.). 1 – четвертичные отложения, 2a – габброанориты, 2б – метагабро, 3 – гранатовые ортоамфиболиты, 4 – плагиомикроклиновые гранитоиды, 5 – метазендриты, 6 – гнейсограниты с высокой концентрацией будин, 7 – мигматизированные гнейсограниты, 8 – пироксениты, 9 – цоизититы, 10a – эклогиты, 10б – квантитовые эклогиты. 11 – разрывные нарушения. 12 – элементы залегания. 13 – объекты исследования.

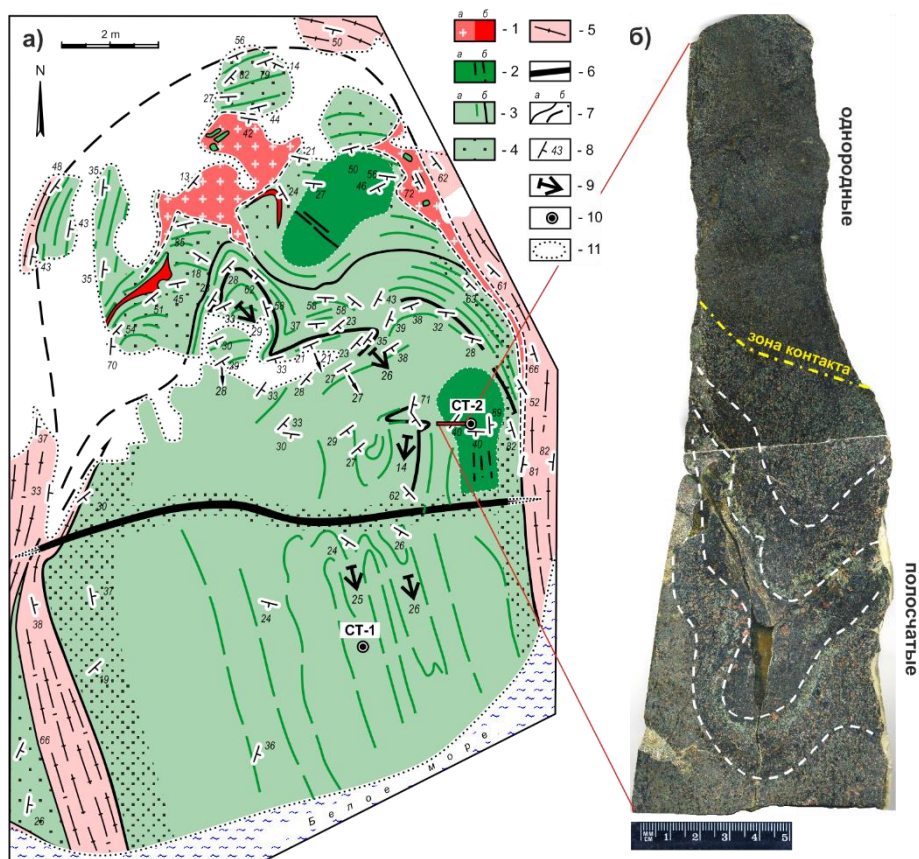


Рис. 3. Остров Столбиха: а – детальная карта геологического строения будины эклогитов (Balagansky et al., 2019 с изменениями): 1а – крупнозернистые граниты, 1б – гранодиоритовые жилы 2.65 млрд лет, 2а – однородные эклогиты, 2б – однородные эклогиты с элементами полосчатости, 3а – полосчатые и смятые в складки ретроградно измененные эклогиты, 3б – зеленый пунктир – структурные линии, 4 – амфиболизированные эклогиты, 5 – архейские ТТГ гнейсы, 6 – пегматиты 1.88 млрд лет, 7а – установленные границы, 7б – предполагаемые границы, 8 – элементы залегания, 9 – шарниры складок, 10 – точки отбора проб, 11 – границы обнажений; б – приполированный срез зоны контакта полосчатых и однородных эклогитов.