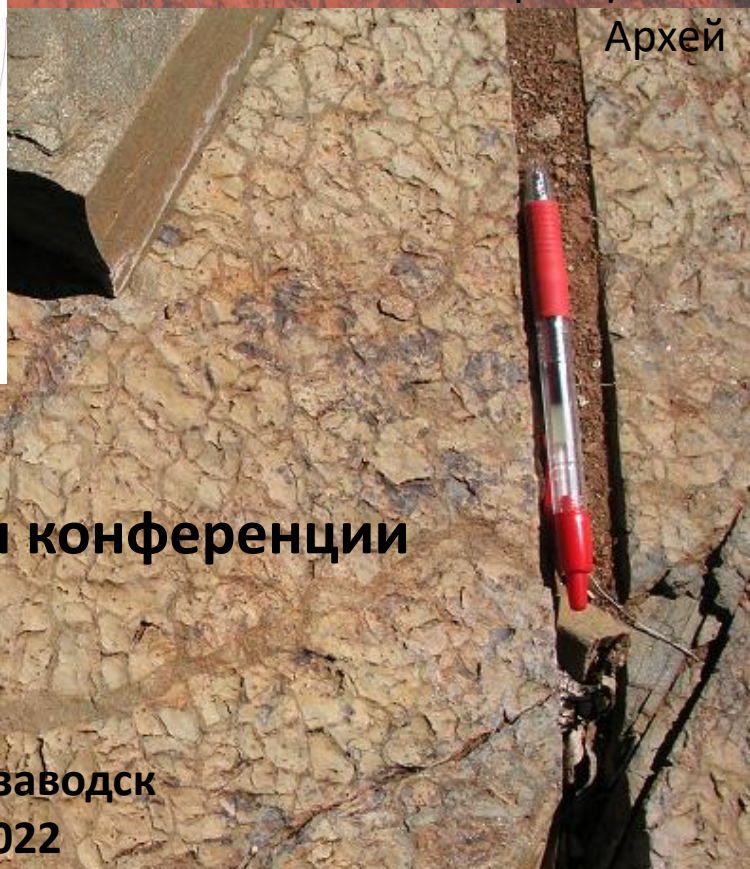


**Геология и геодинамика
архея и протерозоя:
сходства и различия с фанерозоем
(Early Precambrian vs
Modern Geodynamics-22)**



Протерозой
Архей



Материалы конференции

Петрозаводск
2022

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ КарНЦ РАН

ГЕОДИНАМИКА РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ: СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ С ФАНЕРОЗОЕМ

Материалы научной конференции

7-9 сентября 2022 г. , Петрозаводск

Петрозаводск
2022

Геология и геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем. Материалы научной конференции. 2022. 162 с.

Сборник включает в себя тезисы докладов (в авторской редакции) на всероссийской (с участием зарубежных ученых) научной конференции «**Геология и геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем**» (**Early Precambrian vs Modern Geodynamics**). Организаторы конференции исходили из того, что познание ранней истории Земли, в том числе особенностей ее геологии и геодинамики, – одна из фундаментальных задач геологии. Исходя из этого, главные темы, которым посвящены материалы, следующие: 1) геология и геодинамика раннего докембрия: сходство и различия с современными; 2) сравнительный анализ геологии и геодинамики архея и протерозоя; 3) суперконтинентальная цикличность и геодинамика; 4) магматические и метаморфические процессы – индикаторы геодинамических обстановок. Материалы включают данные по геологии фундамента Восточно-Европейского, Сибирского и Антарктического кратонов, Кавказского сегмента Альпийско-Гималайского орогена.

Организационный комитет конференции

Председатель:

Слабунов А.И. – д.г.-м.н., ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск)

Заместители председателя:

Светов С.А. – д.г.-м.н., ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск)

Степанова А.В. – к.г.-м.н., ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск)

Ученый секретарь:

Нестерова Н.С. – к.г.-м.н., ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск)

Члены организационного комитета:

Балаганский В.В. – д.г.-м.н., ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты)

Балтыбаев Ш.К. – д.г.-м.н., ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург)

Божко Н.А. – профессор, д.г.-м.н. МГУ геологический факультет (г. Москва)

Высоцкий С.В. – д.г.-м.н., ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток)

Донская Т.В. – д.г.-м.н., ИЗК СО РАН (г. Иркутск)

Лубнина Н.В. – профессор, д.г.-м.н. МГУ геологический факультет (г. Москва)

Савко К.А. – профессор, д.г.-м.н. ВГУ геологический факультет (г. Воронеж)

Самсонов А.В. – чл.-корр. РАН, ИГЕМ РАН (г. Москва)

Туркина О.М. – д.г.-м.н., ИГМ СО РАН (г. Новосибирск)

Щипанский А.А. – д.г.-м.н., ГИН РАН (г. Москва)

Издано в авторской редакции

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Абдрахманов И. А., Гульбин Ю. Л., Гембицкая И. М.</i> ЭВОЛЮЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ГРАНУЛИТОВ ОАЗИСА БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА, КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ИХ ФОРМИРОВАНИЯ.....	7
<i>Азимов П. Я.</i> ПРОИСХОЖДЕНИЕ “ХОЛОДНЫХ” (НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ) ГРАНУЛИТОВ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА: РОЛЬ УГЛЕКИСЛОТНОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ФЛЮИДА.....	10
<i>Арзамасцев А.А.</i> ЭВОЛЮЦИЯ МАГМАТИЗМА ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ПЕЧЕНГА-ВАРЗУГСКОГО РИФТА С ПОЗИЦИЙ НОВЫХ ДАННЫХ ПО НЕОГЕН-ЧЕТВЕРТИЧНЫМ РИФТОГЕННЫМ СТРУКТУРАМ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ.....	13
<i>Балаганский В.В.</i> ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ЛАПЛАНДСКО-КОЛЬСКИЙ КОЛЛИЗИОННЫЙ ОРОГЕН (ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ).....	16
<i>Балаганский В.В., Максимов О.А., Горбунов И.А., Горбунова Т.В., Мудрук С.В., Сидоров М.Ю., Сибелев О.С., Слабунов А.И.</i> РАННЕДОКЕМБРИЙСКИЕ ЭКЛОГИТЫ БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ (ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ).....	18
<i>Балтыбаев Ш.К.</i> СВЕКОФЕННСКИЙ АККРЕЦИОННЫЙ ОРОГЕН: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЕГО СТРОЕНИИ И ЭВОЛЮЦИИ.....	20
<i>Божко Н. А.</i> НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИКИ НЕОПРОТЕРОЗОЯ.....	23
<i>Бондарь И.В., Маринин А.В.</i> КРУПНАЯ ЗОНА РАСТЯЖЕНИЯ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА.....	26
<i>Веселовский Р.В., Самсонов А.В., Степанова А.В., Сальникова Е.Б., Арзамасцев А.А., Егорова С.В., Ерофеева К.Г., Стифеева М.В., Щербаков В.П., Щербакова В.В.</i> ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ И ГЕОХРОНОЛОГИЯ АРХЕЙСКИХ ДАЕК КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА: ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ.....	29
<i>Возняк А.А., Носова А.А., Лебедева Н.М.</i> ПРОЦЕССЫ НЕСМЕСИМОСТИ И ФРАКЦИОННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ВУЛКАНИТАХ ЛАДОЖСКОГО ГРАБЕНА, РОССИЯ.....	32
<i>Володичев О.И., Кузенко Т.И.</i> МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СООТНОШЕНИЯ АРХЕЙСКИХ И ПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГЕНЕРАЦИЙ ЦИРКОНОВ ИЗ МАССИВНЫХ ЭКЛОГИТОВ О-ВА СТОЛБИХА (РАЙОН С. ГРИДИНО, БЕЛОМОРСКАЯ ПРОВИНЦИЯ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА).....	35
<i>Володичев О.И., Максимов О.А., Кузенко Т.И.</i> ПРОЦЕССЫ ЭКЛОГИТИЗАЦИИ (?) В ДАЙКАХ ОЛИВИНОВЫХ ГАББРОНОРИТОВ (РАЙОНЫ С. ГРИДИНО И ДЕР. ПОНЬГОМА, БЕЛОМОРСКАЯ ПРОВИНЦИЯ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА).....	39
<i>Высоцкий С.В., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В.</i> МУЛЬТИИЗОТОПНЫЙ ($\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{36}\text{S}$) СОСТАВ СЕРЫ СУЛЬФИДОВ ДРЕВНИХ РУД: ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СЕРЫ, БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ГЕНЕЗИСА МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	42
<i>Ерофеева К.Г., Самсонов А.В., Пилицына Т.А., Ларионов А.Н., Спиридонов В.А., Постников А.В., Вовшина А.Ю., Дубенский А.С.</i> РЕЛИКТЫ РАЗРУШЕННЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ОСТРОВНЫХ ДУГ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОМ ВЯТСКОМ ОРОГЕНЕ (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ КРАТОН).....	45

<i>Имамвердиев Н.А.</i> ВЛИЯНИЕ ДРЕВНЕГО СУБДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОЗДНЕКОЛЛИЗИОННОГО ВУЛКАНИЗМА МАЛОГО КАВКАЗА.....	48
<i>Каулина Т.В., Нерович Л.И., Бочаров В.И., Шиловских В.В., Ильченко В.Л.</i> ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ РАССЛОЕННЫЙ МАССИВ ЯРВА-ВАРАКА (КОЛЬСКИЙ РЕГИОН) – ВОЗМОЖНАЯ АСТРОБЛЕМА.....	52
<i>Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О.</i> ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	55
<i>Козлов П.С.</i> СЕВЕРО-ЕНИСЕЙСКИЙ ОРОГЕН (ЗАПАДНАЯ ОКРАИНА СИБИРСКОГО КРАТОНА): ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ТЕКТОНО-МЕТАМОРФИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	59
<i>Козловский В.М., Травин В.В., Зингер Т.Ф., Курдюков Е.Б., Якушик М.А.</i> АРХЕЙСКИЕ ЧАРНОКИТ-ЭНДЕРБИТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ БЕЛОМОРЬЯ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ РАСПЛАВОВ.....	62
<i>Кориш Е.Х., Савко К.А., Сальникова Е.Б., Самсонов А.В., Иванова А.А., Ларионов А.Н., Цыбуляев С.В.</i> ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ДИОРИТ-ГРАНОДИОРИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ КУРСКОГО БЛОКА САРМАТИИ: РАСШИФРОВКА СБЛИЖЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ.....	65
<i>Кравченко А.А., Анисимова Г.С., Берёзкин В.И., Попов Н.В., Лоскутов Е.Е., Журавлёв А.И.</i> ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГРАНУЛИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СЕВЕРА АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА.....	68
<i>Кудряшов Н.М., Галеева Е.В., Удоратина О.В., Калинин А.А., Гроув М.</i> АРХЕЙСКАЯ ЭПОХА РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО (Li, Cs) ПЕГМАТИТООБРАЗОВАНИЯ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА.....	71
<i>Лебедева Н.М., Носова А.А.</i> МИНЕРАЛОГИЯ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО ДУБРАВИНСКОГО МАССИВА.....	75
<i>Лиханов И.И.</i> РЕКОНСТРУКЦИЯ P-T-t ТРЕНДОВ И ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНЫХ ПРИЧИН МЕТАМОРФИЗМА В ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ КОЛЛИЗИИ, РАСТЯЖЕНИЯ И СДВИГОВЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ.....	78
<i>Лиханов И. И.</i> АНОРОГЕННЫЙ МАГМАТИЗМ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО ПРОЦЕССОВ РАСПАДА СУПЕРКОНТИНЕНТОВ.....	81
<i>Лиханов И.И.</i> НОВЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ГРЕНВИЛЬСКИХ И ВАЛЬГАЛЬСКИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА НА ПРИМЕРЕ ГАРЕВСКОГО МЕТАКОМПЛЕКСА ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА.....	84
<i>Лубнина Н.В., Слабунов А.И., Степанова А.В., Нестерова Н.С.</i> БЕЛОМОРСКИЙ ПОДВИЖНЫЙ ПОЯС В СОСТАВЕ СУПЕРКОНТИНЕНТА НУНА/КОЛУМБИЯ: НОВЫЕ ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ.....	87
<i>Максимов О.А.</i> P-T-t ТРЕНДЫ МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭКЛОГИТОВ ГРИДИНСКОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ (ОСТРОВ СТОЛБИХА И УЧАСТОК САМЬЛИНО).....	92

<i>Медведев П.В.</i> ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ ФОРМАЦИИ ДОКЕМБРИЯ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ	95
<i>Межеловская С.В., Межеловский А.Д.</i> ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКАЯ СТРУКТУРА ВЕТРЕНЬЙ ПОЯС: НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ	98
<i>Мыскова Т.А., Никонова А.С., Никонов К.А., Житникова И.А., Львов П.А.</i> КИЧАНСКАЯ ОСТРОВОДУЖНАЯ СИСТЕМА АРХЕЯ (НОВЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА)	101
<i>Носова А.А., Лебедева Н.М., Возняк А.А.</i> ТОЛЕИТОВЫЙ БАЗИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ, СВЯЗАННЫЙ С ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОТЕРОЗОЙСКИХ АНОРТОЗИТ-МАНГЕРИТ-ЧАРНОКИТ-ГРАНИТНЫХ (АМСГ) КОМПЛЕКСОВ: ПРИМЕР МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ФЕРРОБАЗАЛЬТОВ ЛАДОЖСКОГО ГРАБЕНА (КАРЕЛИЯ)	104
<i>Петракова М.Е., Савко К.А., Балтыбаев Ш.К.</i> МАГМАТИЗМ ДОНСКОГО ТЕРРЕЙНА ВОЛГО-ДОНСКОГО ОРОГЕНА	107
<i>Полянский О.П., Ножкин А.Д., Сокол Э.В.</i> ПСЕВДОТАХИЛИТЫ ГЛАВНОГО АНАБАРСКОГО РАЗЛОМА (АНАБАРСКИЙ ЩИТ) – ПЕТРОЛОГО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ВОЗРАСТ ДЕФОРМАЦИЙ	110
<i>Пыстин А.М., Пыстина Ю.И., Гракова О.В., Уляшева Н.С.</i> ВОЗРАСТНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЕРХНЕГО ДОКЕМБРИЯ ПРИПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО УРАЛА: К ВОПРОСУ О ВРЕМЕНИ ЗАЛОЖЕНИЯ ТИМАНСКОЙ ПАССИВНОЙ ОКРАИНЫ	114
<i>Савко К.А., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Овчинникова М.Ю.</i> ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ГИДРОСФЕРЫ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ САРМАТИИ	117
<i>Самсонов А.В., Степанова А.В., Сальникова Е.Б., Ларионова Ю.О., Ларионов А.Н.</i> ГЕОДИНАМИКА РАСКОЛА ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА 2.1 МЛРД ЛЕТ НАЗАД	120
<i>Светов С.А., Чаженгина С.Ю., Степанова А.В.</i> КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОЙ ИСТОРИИ ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ: РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ, ПРИЧИНЫ, СЛЕДСТВИЯ	123
<i>Скублов С.Г., Березин А.В., Салимгареева Л.И.</i> РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ДАТИРОВАНИЯ ЭКЛОГИТОВ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА	124
<i>Слабунов А.И.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ АРХЕЙСКОГО И ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ОРОГЕНОВ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА	127
<i>Слабунов А.И., Кервинен А.В., Нестерова Н.С., Егоров А.В., Максимов О.А., Медведев П.В.</i> ПОЛИХРОННАЯ ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕОАРХЕЙСКИХ ПОЛОСЧАТЫХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ГЛАВНОЙ РУДНОЙ ТОЛЩИ КОСТОМУКШСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА: ВОЗРАСТ ЦИРКОНОВ И АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ	131
<i>Слабунов А.И., Светов С.А., Степанова А.В., Медведев П.В., Полин А.К.</i> НОВАЯ ТЕКТОНИЧЕСКАЯ КАРТА КАРЕЛИИ: ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ	135

<i>Степанова А.В., Самсонов А.В., Сальникова Е.Б., Егорова С.В., Ларионова Ю.О., Арзамасцев А.А., Ларионов А.Н., Веселовский Р.В.</i> ВЕЛИКАЯ ДАЙКА КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА – МАРКЕР АРХЕЙСКОЙ КРАТОНИЗАЦИИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА	141
<i>Суханова М.А., Сальникова Е.Б., Азимов П.Я., Степанова А.В.</i> МОНАЦИТ ИЗ ГЛИНОЗЁМИСТЫХ ГНЕЙСОВ ЧУПИНСКОГО ПОЯСА, КАК ИНДИКАТОР ДВУХ ЭТАПОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТАМОРФИЗМА В БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ	144
<i>Сухоруков В.П., Савельева В.Б.</i> ЭТАПЫ И ВОЗРАСТ МЕТАМОРФИЗМА В ПОРОДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КИТОЙСКОГО БЛОКА (ШАРЫЖАЛГАЙСКИЙ ВЫСТУП СИБИРСКОГО КРАТОНА)	146
<i>Туркина О.М.</i> АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА МАНТИЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ БАЗИТОВЫХ АССОЦИАЦИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ Nd ДАННЫХ	149
<i>Туркина О.М., Изох А.Э., Бережная Н.Г.</i> ЭВОЛЮЦИЯ МАНТИИ ОТ АРХЕЯ К ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЮ: СИНТЕЗ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ Nd ДАННЫХ ДЛЯ МАФИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ ЮГО-ЗАПАДА СИБИРСКОГО КРАТОНА	152
<i>Турченко С.И.</i> СРАВНИТЕЛЬНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ АРХЕЙ-ПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЭТАПОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ	155
<i>Щипанский А.А.</i> КОЛЛИЗИОННЫЙ ОРОГЕНЕЗ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ: СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТЕКТОНИКА ПРИРОДНЫХ ОРОГЕНОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	159
<i>Устинова В.В., Степанова А.В.</i> ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ (2.01 И 1.96 МЛРД ЛЕТ) БАЗИТЫ ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА: СОСТАВ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ	162



УДК 552.42 (99)

ЭВОЛЮЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ГРАНУЛИТОВ ОАЗИСА БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА, КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

И. А. Абдрахманов¹, Ю. Л. Гульбин², И. М. Гембицкая²

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия, ilnur_01_95@mail.ru*

²*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

В докладе рассмотрены закономерности вещественного состава метапелитовых гранулитов. На основе данных минеральной термобарометрии, физико-химического моделирования и изотопного датирования парагенезисов выделено два этапа мезопротерозойского метаморфизма. Показано, что более ранний этап характеризовался сверхвысокими (>900 °С) пиковыми температурами и был связан с коллизионным событием в ходе формирования суперконтинента Родиния, второй этап протекал в условиях амфиболитовой фации в обстановке пост-коллизионного растяжения орогена.

Ключевые слова: метапелитовые гранулиты, геотермобарометрия, изохимические диаграммы, УНТ метаморфизм, оазис Бангера, Восточная Антарктида.

EVOLUTION OF MINERAL ASSEMBLAGES IN GRANULITES FROM BUNGER HILLS, EAST ANTARCTICA AS A RESULT OF THEIR GEODYNAMIC SETTING

I. A. Abdrakhmanov¹, Yu. L. Gulbin², I. M. Gembitskaya²

¹*Academician I. S. GRAMBERG All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, St. Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia*

The paper discusses the mineral composition of metapelitic granulites. Two phases of Mesoproterozoic metamorphism are suggested from mineral thermobarometry, isochemical phase diagram modeling, and geochronology. It is shown that the early metamorphism was ultra-high temperature (UHT) grade and associated with collisional tectonics during the Rodinia supercontinent amalgamation. The later metamorphism was amphibolite-facies and taken place in a post-collisional extensional tectonic regime.

Key words: metapelitic granulite, geothermobarometry, phase isochemical diagram, UHT metamorphism, Bunger Hills, East Antarctica.

1. Геология. Комплекс магматических и метаморфических пород оазиса Бангера (западная часть Земли Уилкса) является частью Восточно-Антарктического щита. В рамках геодинамической реконструкции Австрало-Антарктического сегмента Гондваны, эта область рассматривается как юго-западная оконечность мезопротерозойского складчатого пояса Олбани-Фрейзер [Tucker et al., 2018]. По данным российских и австралийских геологов [Равич и др. 1965; Sheraton et al., 1995], территория оазиса сложена в южной части крупными телами неоархейских тоналит-гранитовых ортогнейсов (~2800–2700 Ma), в северной – вулканогенно-осадочной толщей палеопротерозойского возраста (1900–1650 Ma), смятой в изоклинальные складки и метаморфизованной в условиях гранулитовой фации. В составе толщи преобладают интенсивно мигматизированные парагнейсы (метапелитовые гранулиты); подчиненное значение имеют амфибол-биотит-пироксеновые сланцы и гнейсы (основные гранулиты). Толща прорвана крупными телами синколлизионных чарнокитоидов с возрастом 1170–1150 Ma.

2. Петрография. Метапелитовые гранулиты сложены преобладающими Grt–Sil (\pm Crд), Grt–Crд и Grt–Орх (\pm Crд) парагенезисами. Гранат (Pu_{30-40}) образует относительно крупные гранобласты. Более мелкие зерна силлиманита и кордиерита ($\text{Mg}\#$ 78–89) формируют линзовидные агрегаты, в интерстициях которых располагаются выделения ильменита и алюмошпинелей, включая низкоцинкистый (ZnO 1–3 мас. %) герцинит (Sp_{17-52}). Силлиманит представлен тремя генерациями, которые наблюдаются в виде включений в гранате (Sil_1), призматических кристаллов в матриксе (Sil_2) и тонко-игольчатых агрегатов, замещающих кордиерит вдоль межзеренных границ (Sil_3). Характерным минералом Grt–Sil гранулитов выступает рутил. Ортопироксен (En_{56-61}) обогащен алюминием (Al_2O_3 до 7–9 мас. %, Al^{M1} до 0.19–0.20 к.ф.). С перечисленными минералами ассоциируют умеренно-кислый плагиоклаз с антипертитами и мезопертит; ксеноморфные выделения полевых шпатов интерпретируются как признак частичного плавления парагнейсов. В ограниченном количестве присутствует высокотитанистый (TiO_2 3–5 мас.%) биотит ($\text{Mg}\#$ 65–84), образующий включения в гранате (Bt_1), пластинчатые кристаллы в матриксе (Bt_2) и совместно с кварцем входящий в состав симплектитов, замещающих гранат и ортопироксен (Bt_3).

3. Термобарометрия. Особенности вещественного состава гранулитов указывают на сверхвысокие (>900 °C) пиковые температуры их образования. Минеральными индикаторами УНТ метаморфизма выступают: (а) парагенезис шпинели с кварцем [Harley, 2008]; (б) высокое содержание элементов-примесей в кварце (Al 20–175 ppm, Fe 35–1260 ppm, Ti 150–280 ppm). Согласно показаниям «Ti-в-кварце» геотермобарометра [Huang, Audétat, 2012], для давлений 6–7 кбар температура кристаллизации этого минерала могла достигать 980–1000 °C. С распадом высокотемпературного твердого раствора кварца связано появление в кварцевых зернах игловидных микровключений рутила и герцинита [Гульбин и др., 2022]; (в) высокое содержание глинозема в ортопироксене. По данным Grt–Орх термобарометрии [Harley, Green, 1982], два минерала были уравновешены в интервале температур и давлений 5–7 кбар, 910–970 °C; (г) широкое развитие в гранулитах закономерных сростков Ilm-Crn-Mag , $\text{Ilm-Crn-Ti-Mag-Usp-Rt}$, Ilm-Rt-Ghn состава, образование которых связано с распадом высокотемпературных твердых растворов. В их числе – пластинчатых сростков ильменита и титансодержащего магнетита с необычно высоким содержанием ульвошпинелевого минала (до 55–78 мол. %), возникших в результате распада твердого раствора $\text{Ti-Mag}_{\text{ss}}$ при температуре, возможно превышавшей 1100 °C [Абдрахманов и др., 2021].

4. Эволюция метаморфизма. Результаты моделирования минеральных парагенезисов (метод изохимических диаграмм, программа Theriak/Domino) в сочетании с данными «Ti-в-биотите» геотермометрии [Henry et al., 2005] позволяют оценить P – T параметры образования раннего парагенезиса (Grt–Sil₁–Bt₁) значениями 6–7 кбар, 760–830 °C. В ходе проградного метаморфизма давление оставалось примерно постоянным или (в случае рутил-содержащих ассоциаций) возрастало до 8–10 кбар. Пиковые парагенезисы (Grt–Sil₂–Sp, Grt–Crд–Sp, Grt–Орх–Crд–Sp) формировались в субсолидусной и гиперсолидусной области (6–7 кбар, >950 °C). Стабилизации шпинели способствовало снижение активности воды в системе, вызванное частичным плавлением парагнейсов. На ретроградной стадии имело место изобарическое (при давлении ~5 кбар) охлаждение до температуры 850–900 °C, приведшее к частичному перераспределению фемических компонентов между сосуществующими минералами. Последующий рост литостатического и водного давления (до ~6 кбар при температуре около 750 °C) стал причиной появления в составе гранулитов позднего парагенезиса (Sil₃–Bt₂₋₃).

5. Геодинамическая интерпретация. По данным LA–ICP–MS U–Pb датирования циркона и монацита из парагнейсов [Tucker et al., 2018], возраст последнего «омоложен» в сравнении с возрастом циркона. Результаты датирования ограничивают временной интервал гранулитового метаморфизма значениями 1220–1180 Ma, «пост-пиковых» изменений пород – значениями 1180–1000 Ma. Результаты наших исследований позволяют интерпретировать эти данные как свидетельство двух этапов метаморфизма. Более ранний «гранулитовый» этап характеризовался закрученной по часовой стрелке «декомпрессионной» P – T траекторией и был связан с



одним из коллизионных событий, сопровождавших формирование суперконтинента Родиния. Более поздний «амфиболитовый» этап проявился в обстановке пост-коллизионного растяжения, вызванной коллапсом орогена, и протекал в условиях роста давления как результата утолщения земной коры за счет интенсивного гранитоидного магматизма.

Литература

Абдрахманов И. А., Гульбин Ю. Л., Гембицкая И. М. Ассоциация Fe–Mg–Al–Ti–Zn оксидов в гранулитах оазиса Бангера, Восточная Антарктида: свидетельства метаморфизма сверхвысоких температур // Записки РМО. 2021. Т. 150. № 4. С. 38–76.

Гульбин Ю. Л., Абдрахманов И. А., Гембицкая И. М., Васильев Е. А. Ориентированные микровключения оксидов системы Al–Fe–Mg–Ti в кварце из метапелитовых гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида // Записки РМО. 2022. Т. 151. № 4. С. 1–18.

Равич М. Г., Климов Л. В., Соловьев Д. С. Докембрий Восточной Антарктиды. М.: Недра. 1965. 470 с.

Harley S. L. Refining the P–T records of UHT crustal metamorphism // J. Metamorph. Geol. 2008. V. 26. P. 125–154.

Harley S. L., Green D. H. Garnet–orthopyroxene barometry for granulites and peridotites. Nature. 1982. V. 300. P. 697–701.

Henry D. J., Guidotti C. V., Thompson J. A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *Amer. Miner.* 2005. V. 90. P. 316–328.

Huang R., Audétat A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: A critical examination and re-calibration // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012. V. 84. P. 75–89.

Sheraton J. W., Tingey R. J., Oliver R. L., Black L. P. Geology of the Bunge Hills-Denman Glacier region, East Antarctica // *AGSO Bull.* 1995. N 244. 136 p.

Tucker N. M., Hand M., Kelsey D. E., Taylor R., Clark C., Paynee J. L. A tripartite approach to unearthing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: an example from the Bunge Hills, East Antarctica // *Precambrian Res.* 2018. V. 314. P. 194–220.

УДК 552.4

**ПРОИСХОЖДЕНИЕ “ХОЛОДНЫХ” (НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ) ГРАНУЛИТОВ
БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА: РОЛЬ УГЛЕКИСЛОТНОГО
МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ФЛЮИДА**

П. Я. Азимов

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, pavel.azimov@mail.ru

В Беломорском подвижном поясе среди метаморфических пород амфиболитовой фации присутствуют отдельные проявления гранулитовых парагенезисов. Термобарометрические расчёты показывают, что в основных породах гранулитовые парагенезисы со скаполитом в некоторых случаях формируются в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений под воздействием богатого углекислотой флюида с низкой $a_{\text{H}_2\text{O}}$, просачивающегося через амфиболиты.

Ключевые слова: основные гранулиты; термобарометрия; метаморфический флюид; Беломорский подвижный пояс.

**ORIGIN OF THE “COLD” (LOW-TEMPERATURE) GRANULITES IN THE BELOMORIAN MOBILE
BELT: THE ROLE OF CARBON DIOXIDE IN METAMORPHIC FLUID**

P. Azimov

Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

In the Belomorian mobile belt manifestations of the granulitic mineral assemblages occurs among the amphibolite facies rocks. Thermobarometric calculations display that some granulitic scapolite-bearing assemblages in mafic rocks were formed during high-temperature, high-pressure amphibolite facies metamorphism. These granulitic assemblages were resulted from the infiltration of a CO_2 -rich fluid with low $a_{\text{H}_2\text{O}}$ through amphibolites.

Key words: mafic granulites; thermobarometry; metamorphic fluid; the Belomorian Mobile Belt.

В Беломорском подвижном поясе (северо-восточная Фенноскандия) интенсивно проявлен палеопротерозойский метаморфизм амфиболитовой фации, сопровождающийся мигматизацией [Слабунов и др., 2017]. Среди пород амфиболитовой фации отмечаются участки и тела, сложенные породами с гранулитовыми парагенезисами, в которых безводные Fe-Mg минералы преобладают над водосодержащими. В породах основного состава это парагенезис $\text{Cpx} + \text{Grt} + \text{Pl} \pm \text{Qtz} \pm \text{Hbl}$, Bt , Scp (без Opx), обычный для высокобарных гранулитов [O'Brien, Rötzer, 2003]. Некоторые из пород с таким парагенезисом в Беломорье являются метагабброидами и сохраняют реликтовую габбровую структуру, часто с реакционными каймами [Stepanova et al., 2022]. Первичная природа других пород неочевидна. Логичное предположение, что гранат-клинопироксеновые парагенезисы сформированы в условиях гранулитовой фации, не всегда оказывается верным. Термобарометрические расчёты показывают, что некоторые из них образованы в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений.

Такие низкотемпературные гранулиты установлены, в частности, в центральной части Беломорского пояса, в окрестностях посёлка Амбарный. Здесь в чёрных гранатовых амфиболитах хетоламбинской толщи встречаются крупнозернистые зеленоватые прожилки с минеральной ассоциацией $\text{Cpx} + \text{Grt} + \text{Hbl} + \text{Scp} + \text{Qtz} \pm \text{Pl} \pm \text{Cal} \pm \text{Czo}$, ориентированные вдоль сланцеватости амфиболита (Рис. 1). Скаполит, в свою очередь, образует белые прожилки в клинопироксеновой породе, которые можно принять за жилки лейкосомы. Этот скаполит содержит только карбонат-анион, без хлора и сульфата. Хлор отсутствует и в амфиболе. Петрографические исследования прожилков показывают, что новообразованная гранулитовая ассоциация замещает обычный амфиболитовый парагенезис $\text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Qtz} + \text{Grt}$. Реликты раннего парагенезиса сохраняются, в частности, в виде включений в порфиробластах граната.



Рис. 1. Прожилки крупнозернистого Scp–Grt–Cpx гранулитов в чёрном Grt амфиболите. Белые прожилки – скаполит. Окрестности пос. Амбарный; центральная часть Беломорского подвижного пояса.

Fig. 1. Veins of the large-grained Scp–Grt–Cpx granulite in black garnetiferous amphibolite. White veinlets are composed of scapolite. Vicinities of the Ambarny village; the central part of the Belomorian Mobile Belt.

Термобарометрические расчёты, выполненные методом TWEEQU [Berman, 1991], свидетельствуют, что и амфиболитовый, и гранулитовый парагенезисы образовались в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений (полученные P -значения: для амфиболитового парагенезиса 7–9 кбар и 650–700°C и для гранулитового – 7–10 кбар и 650–730°C; эти величины практически совпадают с учётом разброса рассчитанных значений). Очевидно, что в данном случае образование гранулитов вызвано не ростом температуры, а снижением активности воды во флюиде, приводящем к расширению поля устойчивости гранулитового парагенезиса в область более низких температур и к замещению водосодержащего минерала (Hbl) безводными (Cpx и Grt). Падение активности воды, в свою очередь, вызвано ростом содержания CO_2 во флюиде. Углекислота фиксируется в породе в скаполите и кальците. Прожилковый характер выделений нового парагенезиса подтверждает роль флюидных потоков в его формировании.

Наблюдаемый процесс в целом схож, видимо, с формированием гранулитовых парагенезисов в палеоархейских биотит-роговообманковых гнейсах Сэнд Ривер (пояс Лимпопо, Южная Африка) при дегидратации под действием углекислотно-солевого флюида [Rajesh et al., 2013]. Механизм этого процесса был подтверждён экспериментальными исследованиями О.Г. Сафонова и соавторов [Safonov et al., 2014]. Однако в отличие от гранулитов Сэнд Ривер, во время образования беломорских “дегидратационных” гранулитов воздействовавший на породу флюид не содержал солевой нагрузки, на что указывает отсутствие хлора в роговой обманке и скаполите.

Таким образом, появление и устойчивость высокобарного гранулитового парагенезиса в условиях амфиболитовой фации повышенных давлений может определяться притоком богатого углекислотой метаморфического флюида, просачивающегося через породы в зоне расланцевания. В тоже время в Беломорском подвижном поясе широко распространены и “высокотемпературные” гранулитовые парагенезисы, возникшие при высокобарном гранулитовом метаморфизме.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГД РАН FMUW-2022-0002.



Литература

Слабунов А. И., Азимов П. Я., Глебовицкий В. А. и др. Архейская и палеопротерозойская мигматизации пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // ДАН. 2016. Т. 467. № 1. С. 71–74. doi: 10.7868/S0869565216070239

Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications. Can. Mineral. 1991. V. 29. P. 833–855.

O'Brien P. J., Rötzler J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics // J. Metamorphic Geol. 2003. V. 21. No. 1. P. 3–20. doi: 10.1046/j.1525-1314.2003.00420.x

Rajesh H. M., Belyanin G. A., Safonov O. G., et al. Fluid-induced dehydration of the Paleoproterozoic Sand River biotite–hornblende gneiss, Central Zone, Limpopo Complex, South Africa // J. Petrol. 2013. V. 54. No. 1. P. 41–74. doi: 10.1093/petrology/egs062

Safonov O. G., Kosova S. A., Van Reenen D. D. Interaction of biotite–amphibole gneiss with H₂O–CO₂–(K, Na)Cl fluids at 550 MPa and 750 and 800°C: Experimental study and applications to dehydration and partial melting in the middle crust // J. Petrol. 2014. V. 55. No. 12. P. 2419–2456. doi: 10.1093/petrology/egu062

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N. et al. Relicts of Paleoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen // Geol. Soc. London Spec. Publ. 2022. V. 518. P. 101–128. doi: 10.1144/SP518-2021-30



**ЭВОЛЮЦИЯ МАГМАТИЗМА ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ПЕЧЕНГА-ВАРЗУГСКОГО РИФТА
С ПОЗИЦИЙ НОВЫХ ДАННЫХ ПО НЕОГЕН-ЧЕТВЕРТИЧНЫМ
РИФТОГЕННЫМ СТРУКТУРАМ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ**

А.А. Арзамасцев

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, arzamas@ipgg.ru

Представлены результаты изучения эволюция магматизма неоген-четвертичных рифтогенных структур Восточно-Африканского рифта, позволяющие, на основе сравнительного анализа, скорректировать хроностратиграфические схемы корреляции палеопротерозойского печенга-варзугского рифта.

Ключевые слова: рифтогенез, магматизм, Печенга-Имандра-Варзугский рифт, Восточно-Африканский рифт.

**EVOLUTION OF MAGMATISM OF THE PALEOPROTEROZOIC PECHENGA-VARZUGA RIFT
FROM THE POSITION OF NEW DATA ON NEOGENE-QUATERNARY RIFT STRUCTURES
OF EAST AFRICA**

A. Arzamastsev

Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

The results of studying the evolution of magmatism in the Neogene-Quaternary rift structures of the East African rift are presented, which allow, based on a comparative analysis, to correct the chronostratigraphic schemes of the correlation of the Paleoproterozoic Pechenga-Varzuga rift.

Key words: Rift, magmatism, Pechenga-Imandra-Varzuga Rift, East-African rift

Печенга-Имандра-Варзугский пояс является примером внутриконтинентальной палеорифтогенной системы, которая за 600 млн лет прошла полный цикл развития: свободообразование, рифтогенез, орогенез и региональный метаморфизм [Смолякин, 1997]. Геохронологическим репером начала заложения этой структуры принято считать образование базитов горы Генеральской (2505±2 млн лет) [Amelin et al., 1995], возраст завершающих магматических событий фиксируется в интервале 1.93 - 1.90 млрд лет назад. Выделенные уже на ранних этапах изучения пояса стратиграфические подразделения [Имандра-Варзугская..., 1982; Федотов, 1985; Предовский и др., 1987], объединяющие в основании каждой свиты осадочные образования, сменяющиеся вверх по разрезу вулканитами, являются подтверждением независимых циклов эндогенной активности. Ключевым элементом, свидетельствующим об автономности каждого цикла, является состав осадочных образований, слагающих основание каждой свиты. В частности, присутствие кор выветривания, а также базальных конгломератов в основании свит, терригенный характер осадков, закономерно сменяющихся все более глубоководными фациями, свидетельствуют о существовании нескольких периодов континентальных обстановок, разделенных эпизодами интенсивного магматизма. Единичные данные геохронологического датирования, полученные по отдельным субвулканическим образованиям разных уровней разреза, не позволяют с достаточной точностью определить возрастные рубежи формирования вулканогенно-осадочных толщ. Реконструкция трендов эволюции магматизма также осложнена отсутствием достаточного количества геохронологических данных, максимальная точность которых составляет в лучшем случае несколько миллионов лет. Еще более неопределенной является оценка соотношения возрастных интервалов осадконакопления и разделяющих их циклов магматической активности. В основу хроностратиграфических схем корреляции [Смолякин, 1997; Melezhik et al., 2012] положены оценки мощности, что подразумевает непрерывность формирования вулканогенно-осадочных комплексов в пределах каждого цикла и значительные

по времени периоды магматической активности, сопоставимые по длительности с интервалами осадкообразования.

Накопленные в последние десятилетия данные об эволюции магматизма в фанерозойских и кайнозойских рифтогенных структурах позволяют с новых позиций оценить характер эволюции раннепротерозойского пояса Печенга-Имандра-Варзуга.

Идея прерывистости ("punctuated") и малой длительности импульсов эндогенной активности, предложенная [Gould and Eldredge, 1993; Martin et al., 2012] в противовес концепции постепенной смены режимов осадкообразования и магматизма ("gradualism"), была проиллюстрирована на примере рифта Грегори [Dawson, 2008], располагающегося в восточной ветви Восточно-Африканской рифтогенной системы. Развитие этой гигантской структуры, начавшееся в зоне Афарского треугольника 45 млн лет назад, продолжается вплоть до настоящего времени [Rooney, 2020]. В пределах южного окончания восточной ветви, на границе с Танзанийским архейским кратоном, на относительно небольшой территории располагается область интенсивного магматизма, представленного крупными покровами базальтов нормального ряда, базанитами, щелочными вулканитами и малыми интрузивными телами. Согласно геохронологическим данным [Le Gall et al., 2008; Mollel et al., 2011; Rooney, 2020], магматизм в этой части рифта, начавшийся на рубеже 5.9 млн лет с формирования щелочных вулканов Эссимингор, Садиман, Мосоник и др., затем сменился обширными излияниями базальтов и базанитов из вулканических центров и кальдер Лемагарут, Нгоронгоро, Олдувай, Олмоти и др. Заключительный цикл вулканизма, продолжающийся до настоящего времени вновь представлен щелочными расплавами и карбонатитами Олдоиньо Ленгаи. Таким образом, на протяжении относительно короткого временного интервала, на относительно небольшой по площади территории, в ходе нескольких магматических импульсов произошла радикальная смена состава расплавов, генерировавшихся из разных мантийных уровней. Малая длительность магматических импульсов и высокая вариативность мантийных расплавов является, по-видимому, общей чертой современных рифтогенных структур. Помимо рифта Грегори, в качестве примеров можно отметить образование крупных излияний платобазальтов Эфиопии, интервал формирования которых составляет 33-27 млн лет [Rooney, 2020]. Примеры относительно коротких интервалов плюм-литосферных процессов, имевших место в фанерозойское время, являются гигантские покровы траппов плато Декан в Индии (~ 68 Ma), Кару-Феррар (183 Ma) сформировавшихся в течение 1-2 млн лет [Burgess et al., 2017], а также траппов Сибири, образование которых происходило в течение двух относительно коротких магматических импульсов [Ivanov et al., 2013]. Бесспорно, характер эндогенных процессов в областях ЛПР и зонах рифтогенеза различен. В последних, вследствие пропации рифта в южном направлении от зоны Афар, этапы осадконакопления, последующей денудации в условиях континентальных обстановок вследствие плюм-литосферных процессов («doming») прерывались относительно короткими (первые млн лет) периодами магматизма [Rooney, 2020]. Следует также отметить широкий спектр составов расплавов, поступающих на поверхность в столь короткие периоды развития структур. В Сибирской провинции типичным толеитовым базальтам, формирующим основной объем траппов (240 Ma), предшествуют высоко-Ti умеренно-щелочные базальты и пикриты, отличающиеся повышенной щелочностью, кремнекислотностью и пониженной ролью железа.

Исходя из этих наблюдений, формирование Печенга-Имандра-Варзугского палеорифта не может рассматриваться с позиций постепенной, непрерывной смены циклов осадконакопления, магматической активности и денудации. Можно полагать, что длительные периоды стабилизации, отвечающие периодам осадконакопления, а также значительные по времени перерывы, происходившие в условиях континентальных обстановок, прерывались относительно короткими импульсами магматизма. Анализ с этих позиций эволюции Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры показывает, что длительность наиболее крупных этапов магматизма зафиксированных на рубежах ~ 2.51, ~ 2.44, 2.06, 2.02 и 1.99 млн лет назад, не превышала нескольких млн лет. Таким образом, с учетом данных по эволюции фанерозойских рифтогенных структур,

хроностратиграфические схемы корреляции Печенга-Имандра-Варзугской структуры, базирующиеся на принципах «градуализма» должны быть пересмотрены с учетом предельно коротких интервалов длительности периодов магматической активности.

Литература

Имандра-Варзугская зона карелид. Л.: Наука, 1982. 280 с.

Предовский А.А., Мележик В.А., Болотов В.И., Федотов Ж.А., Басалаев А.А., Козлов Н.Е., Иванов А.А., Жангуров А.А., Скуфьин П.К., Любцов В.В. Вулканизм и седиментогенез докембрия северо-востока Балтийского щита. Л.: Наука, 1987. 185 с.

Смолькин В.Ф. Магматизм раннепротерозойской (2.5–1.7 млрд лет) палеорифтогенной системы, северо-запад Балтийского щита // *Петрология*. 1997. Т. 5. № 4. С. 394–411.

Федотов Ж.А. Эволюция протерозойского вулканизма восточной части Печенгско-Варзугского пояса (петрогеохимический аспект). Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1985. 118 с.

Amelin Yu.V., Heaman L.M., Semenov V.S. U–Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implication for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // *Precambrian Res.* 1995. V. 75. P. 31–46.

Burgess S.D., Muirhead J.D., Bowring S.A. Initial pulse of Siberian Traps sills as the trigger of the end-Permian mass extinction // *Nature Communications*. DOI: 10.1038/s41467-017-00083-9.

Dawson, J.B. The Gregory Rift Valley and Neogene-Recent Volcanoes of Northern Tanzania. Geological Society of London, Memoirs, 2008. V. 33.

Gould, S.J., Eldredge, N. Punctuated equilibrium comes of age. *Nature* 1993. V. 366, 223–227.

Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism // *Earth-Science Reviews*. 2013. V.122. p. 58-76.

Le Gall, B., Nonnotte, P., Rolet, J., Benoit, M., Guillou, H., Mousseau-Nonnotte, M., Albaric, J. & Deverchère, J. Rift propagation at craton margin. Distribution of faulting and volcanism in the North Tanzanian Divergence (East Africa) during Neogene times. *Tectonophysics*. 2008. 448, 1-19.

Martin R. F., Sokolov M., Magaji S.S. Punctuated anorogenic magmatism // *Lithos*, 2012, V. 152, p. 132-140.

Melezhik V. (Ed.), Prave A.R., Fallick A.E., Kump L.R., Strauss H., Lepland A., Hanski E.J. Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Volume 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Springer, 2012. 490 p.

Mollet G.F., Swisher III, C.C., Feigenson M.D. & Carr M.J. Petrology, geochemistry, and age of Satiman, Lemagurut and Oldeani: sources of the volcanic deposits of the Laetoli area. In: Harrison, T. (ed.) *Paleontology and Geology of Laetoli: Human Evolution in Context*. Vol.1: Geology, Geochronology, Paleocology and Paleoenvironment. 2011. Dordrecht: Springer, pp. 99-120.

Rooney, T.O. The Cenozoic magmatism of East Africa: Part II – Rifting of the mobile belt. *Lithos*. 2020. V.360–361, 105291.



УДК 551.71/72

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ЛАПЛАНДСКО-КОЛЬСКИЙ КОЛЛИЗИОННЫЙ ОРОГЕН (ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ)

В. В. Балаганский

Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, balagan@geoksc.apatity.ru

Палеопротерозойский Лапландско-Кольский коллизионный ороген (ЛКО) был выделен в начале 1990-х гг. Дэвидом Бриджуотером на севере Фенноскандинавского щита (ФЩ) и сопоставляется с Нагссутокидским орогеном в Гренландии и орогеном Торнгат в Канаде. Палеопротерозойские коллизионные события на севере Фенноскандии обычно связываются со Svecofennic орогением в центральной и южной частях ФЩ. Однако ЛКО обнаруживает и сходные, и разные черты его строения, возраста и эволюции по сравнению с таковыми Svecofennic аккреционного орогена (СО). Принципиальное сходство заключается в том, что главные структуры ядра ЛКО, как и весь СО, сложено палеопротерозойской ювенильной корой и содержит островодужные осадочные и магматические комплексы. Принципиальные различия заключаются в следующем. (1) Возраст лапландско-кольской океанической коры оценивается в ~ 2.00–2.05 млрд лет (в СО ~ 1.96 млрд лет). (2) В отличие от Svecofennic океана, Лапландско-Кольский океан был заложен на архейской континентальной коре, относится к красноморскому типу и просуществовал всего лишь первые десятки миллионов лет. (3) Первые островодужные комплексы ЛКО имеют возраст 1.96–1.97 млрд лет (в СО 1.90–1.92 млрд лет назад). (4) Метаморфизм в ЛКО был низкоградиентным и достигал условий высокобарической гранулитовой фации (в СО – высокоградиентный, пик – низкобарическая гранулитовая фация). (5) Пик метаморфизма и коллизии в ядре ЛКО был достигнут ~ 1.92–1.93 млрд лет назад при завершении там этих процессов к рубежу ~ 1.89 млрд лет (на севере СО тогда происходили только первые метаморфические и деформационные события, которые завершились на юге орогена ~ 1.80 млрд лет назад). (6) В ЛКО посторогенный гранитный метаморфизм имел место ~ 1.80 млрд лет (наттанен-граниты), а в СО – 1.64–1.47 млрд лет (граниты рапакиви). (7) Лапландско-кольская орогения интерпретируется как коллизионная, длилась ~ 70 млн лет и включала по одному эпизоду субдукции и коллизии, возраст которых немного варьировал по простиранию ЛКО. Svecofennic орогения была аккреционной и комплексной, включала несколько крупных орогенических эпизодов и длилась ~ 120 млн лет. (8) Наконец, ЛКО отделен от СО Карельской провинцией и провинцией Норрботтен, фундамент которых сложен архейскими породами и был в разной степени перекрыт палеопротерозойскими супракрустальными комплексами и также в разной степени испытал метаморфическую и деформационную переработку. Таким образом, главные орогенические события в ЛКО предшествовали таковым СО, а вместе они связываются с проявлением комплексной лапландско-свекофеннской орогении ~ 2.0–1.8 млрд лет как выражением суперконтинентального цикла Вильсона и формированием ФЩ как фрагмента палеопротерозойского суперконтинента Нуна (Колумбия).

Ключевые слова: Лапландско-Кольский ороген, коллизия, аккреция, ювенильная кора, палеопротерозой, Фенноскандинавский щит.

PALEOPROTEROZOIC LAPLAND-KOLA COLLISIONAL OROGEN (FENNOSCANDIAN SHIELD)

V.V. Balagansky

Geological Institute of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

The Paleoproterozoic Lapland-Kola collisional orogen (LKO) was established by David Bridgwater in the northern Fennoscandian Shield in the very beginning of the 1990s. This is correlated to the Naggssuotqidian Orogen in Greenland and the Torngat Orogen in Canada. In northern Fennoscandia Paleoproterozoic collisional events have been



recently correlated to the Svecofennian orogeny in the central and southern FS. However, the LKO displays peculiarities of its structure, age, and evolution which are both similar to and different from those of the Svecofennian accretionary orogen (SO). The principal similarity between these orogens is that the tectonic units of the LKO core and the entire SO are composed of Paleoproterozoic juvenile core and consist of island-arc igneous and sedimentary complexes. The principal distinctions are as follows. (i) An age of oceanic crust is estimated at $\sim 2.00\text{--}2.05$ Ga in the LKO and ~ 1.96 Ga in the SO. (ii) Unlike the Svecofennian ocean, the Lapland-Kola ocean was opened on an Archean continental crust, existed just the first tens of billions years, and is classified as an Red Sea type ocean. (iii) The oldest island-arc complexes are dated at $1.96\text{--}1.97$ Ga in the LKO and at $1.90\text{--}1.92$ Ga in the SO. (iv) In the LKO, metamorphism is characterized by a low geothermal gradient and its peak reached high-pressure granulite-facies conditions, whereas in the SO, metamorphism is characterized by a high thermal gradient and its peak reached low-pressure granulite-facies conditions. (v) In the eastern part of the LKO core, metamorphism and deformation reached their peak $1920\text{--}1930$ Ma ago and terminated $30\text{--}40$ Ma later. At the same time, only the first metamorphism and deformation happened in the northern and northeastern SO and final metamorphism and deformation are dated at ~ 1800 Ma in the southern and southwestern SO. (vi) In the LKO post-orogenic granites formed ~ 1.8 Ga ago (Nattanen-type granites), whereas in the SO $1.64\text{--}1.47$ Ga ago (rapakivi granites). (vii) The Lapland-Kola orogeny is classified as collisional and consisted of only one episode of subduction and collision which lasted ~ 70 Ma and their age was slightly different in the eastern and western parts of the LKO. In contrast, the Svecofennian orogeny was accretionary and complex, consisted of several large orogenic episodes and lasted $\sim 120\text{--}130$ Ma. (viii) At last, the LKO is separated from the SO by the Karelian and Norrbotten provinces whose basements are composed of Archean rocks, were covered Paleoproterozoic supracrustal complexes in a different degree and experienced metamorphic and deformational reworking also in a different extent. Thus, in the LKO major orogenic events preceded those in the SO, all these together can be related to the Lapland-Svecofennian complex orogeny which lasted from 2.0 Ga to 1.8 Ga, can be classified as a component of the Wilson supercontinental cycle, and formed the Fennoscandian Shield as a fragment of the Paleoproterozoic Nuna (Columbia) supercontinent.

Key words: Lapland-Kola orogen, collisional, accretion, juvenile crust, Paleoproterozoic, Fennoscandian shield.



УДК 552.48:551.71/72

**РАННЕДОКЕМБРИЙСКИЕ ЭКЛОГИТЫ БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ
(ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ)**

**В. В. Балаганский¹, О. А. Максимов², И. А. Горбунов¹, Т. В. Горбунова¹, С. В. Мудрук¹, М. Ю. Сидоров¹,
О. С. Сибелев², А. И. Слабунов²**

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, balagan@geoksc.apatity.ru

²Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Выполнено комплексное исследование реликтов эклогитов в архейском Гридинском амфиболито-гранитогнейсовом меланже Беломорской провинции. В этом меланже О.И. Володичев и его коллеги впервые в 2004 г. описали беломорские эклогиты, а в 2021 г. сообщили о первой находке в них архейского метаморфического циркона с включениями омфациита как свидетельство архейского эклогитового метаморфизма. Реликты эклогитов были изучены нами в будинах амфиболитов на участках Столбиха и Избная Луда. Амфиболиты вместе с вмещающими гранитогнейсами испытали неоднократное расщепление и складчатость. Выделены два возрастные группы эклогитов. Древние эклогиты обоих участков полностью симплектитизированы, нередко имеют хорошо выраженную полосчатость, часто будинированы и вместе с гранитогнейсами смяты в сжатые до изоклинальных складки. В отличие от них, молодые эклогиты развиты только на участке Столбиха и слагают небольшие (1–2 м в поперечнике) тела являются массивными, обнаруживают меньшую степень симплектитизации и местами сохраняют почти неизменный первичный парагенезис омфациит + гранат + кварц + рутил. Граница наиболее изученного тела массивных эклогитов пересекает полосчатые и смятые в складки древние эклогиты. Внутри этого тела наблюдаются реликты исходных для них пород, ориентировка которых отвечает ориентировкам крыльев ранних и поздних складок в древних полосчатых эклогитах. Датирование древних эклогитов участка Столбиха по метаморфическому циркону подтвердило их возраст ~2.71–2.72 млрд лет. По многочисленным литературным данным, возраст молодых эклогитов этого участка составляет ~1.91 млрд лет. В отличие от них, древние эклогиты участка Избная Луда содержат пять генераций метаморфогенного циркона, самая древняя из которых имеет возраст 2.83 млрд лет, а самая молодая – 2.62 млрд лет; палеопротерозойские цирконы не были обнаружены. Таким образом, структурные и геохронологические данные свидетельствуют о проявлении в Беломорской провинции двух эклогитовых метаморфизмов, первый из которых связывается с архейской Беломорской аккреционно-коллизонной орогенцией, а второй – с палеопротерозойской Лапландско-Кольской коллизонной орогенцией.

Ключевые слова: эклогит, орогенция, архей, палеопротерозой, Беломорская провинция, Фенноскандинавский щит

**EARLY PRECAMBRIAN ECLOGITES OF THE BELOMORIAN PROVINCE
(FENNOSCANDIAN SHIELD)**

V. V. Balagansky¹, O. A. Maksimov², I. A. Gorbunov¹, T. V. Gorbunova¹, S. V. Mudruk¹, M. Yu. Sidorov¹, O. S. Sibelev², A. I. Slabunov²

¹Geological Institute of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

²Institute of Geology of the Karelian Research Center of the RAS, Petrozavodsk, Russia

This communication deals with a multidisciplinary study of eclogite relics in the Archean Gridino amphibolite-granitic gneiss mélangé of the Belomorian province. O.I. Volodichev and his colleagues described eclogites in this mélangé for the first time in 2004 and reported the first finding of Archean metamorphic zircon with omphacite inclusions as evidence of Archean eclogite-facies metamorphism in 2021. We have studied eclogite relics that occur in amphibolite boudins in the Stolbikha and Iznaya Luda study areas. Amphibolites and the country granitic gneisses



experienced multiple shearing and folding. Two age groups of eclogites have been established. The older eclogites are almost completely changed into plagioclase-clinopyroxene symplectites, display locally a well-developed banding, often are boudinized, and are deformed into tight to isoclinal folds together with the country granitic gneisses. In contrast, the younger eclogites occur only in the Stolbikha study area and compose small (1–2 m across) bodies, are massive, display a lower extent of retrogression and contain locally the almost non-retrogressed original mineral assemblage omphacite + garnet + quartz + rutile. The best studied body of the younger eclogites truncates the older banded and folded eclogites. This body contains relics of the original rock whose orientations are consistent with those of limbs of early and later folds in the older banded eclogites. In the Stolbikha study area, a dating of metamorphic zircon from the older eclogites has confirmed their ages of ~ 2.71–2.72 Ga. Numerous literature reports a younger eclogite age of ~ 1.91 Ga. In contrast, in the Izbnya Luda study area, the older eclogites contain five generations of metamorphic zircon, and the oldest and youngest metamorphic zircons are dated at 2.83 Ga and 2.62 Ga respectively; no Paleoproterozoic zircons have been found. Thus, according to structural and geochronological data, two eclogite-facies metamorphic events occurred in the Belomorian province: the first event is related to the Archean accretionary–collisional orogeny and the second event with the Paleoproterozoic Lapland-Kola collisional orogeny.

Key words: eclogite, orogeny, Archean, Paleoproterozoic, Belomorian province, Fennoscandian shield



УДК 55 (551.21)

**СВЕКОФЕННСКИЙ АККРЕЦИОННЫЙ ОРОГЕН:
СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЕГО СТРОЕНИИ И ЭВОЛЮЦИИ**
Ш.К. Балтыбаев

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, shauket@mail.ru

Важней характеристикой пород Свекофеннского орогена является преимущественно ювенильная природа вещества протерозойской коры и отсутствие геологических, петрологических и изотопно-геохимических свидетельств существования пород архейского комплекса в основании новообразованного блока свекофеннид. Все породы в пределах Свекофеннского орогена метаморфизованы в условиях от зеленосланцевой до гранулитовой фации метаморфизма при ранне- и поздне-свекофеннском этапах эндогенной активности. Современная конфигурация и структуры зоны стыка между Свекофеннским орогеном и Карельским кратоном отражают последовательное развитие ороклинов, а не субпараллельную амальгамацию островодужных комплексов.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; Свекофеннский ороген; зона сочленения; тектонические модели.

**SVECOFENNIAN ACCRETION OROGEN:
MODERN VIEWS ON ITS STRUCTURE AND EVOLUTION**
S. K. Baltybaev

Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

The most important characteristic of the Svecofennian orogen is mainly the juvenile nature of the substances of the Proterozoic crust and the absence of geological, petrological and isotopic-geochemical evidence of the existence of rocks of the Archean complex at the base of the newly formed block of the svecofennians. All volcano-sedimentary rocks are altered up to granulite facies of metamorphism during two stages of endogenous activity. Modern configuration and the structure of the joint suture zone between Svecofennian orogeny and Karelian craton reflect the consistent development of oroclines, and not subparallel amalgamation of the island-arc complexes.

Key words: Fennoscandian Shield; Svecofennian orogen; suture zone; tectonic models.

Свекофеннский ороген (СО) занимает не менее 1/3 площади выхода докембрийских пород Фенноскандии и является ярким представителем проявления аккреционной геодинамики в палеопротерозое. Хотя первые предположения об образовании палеопротерозойского комплекса вулканогенно-осадочных и плутонических пород в обстановках, сходных с обстановками современных активных окраин, высказывались давно [Nietanen, 1975], убедительный фактический материал был накоплен и проинтерпретирован только к концу 80-х годов прошлого века [Park, 1985; Gaal, Gorbachev, 1987 и др.]. Наиболее весомым аргументом в пользу существования обстановки «океан-континент» стало выявление пород двух офиолитовых комплексов на территории Финляндии - Йормуа и Оутокумпу [Kontinen, 1981]. Несмотря на различную интерпретацию природы и места образования этих комплексов (фрагмент океанической коры Свекофеннского океана или это сохранившееся вещество задугового бассейна), исследователи сходились во мнении, что они маркируют древнюю конвергентную границу.

Ключевая роль в развитии свекофеннид Фенноскандии отводится амальгамации нескольких микроконтинентов и островодужных структур возраста 1.95-1.97 млрд лет. Но не исключается существование в пределах СО протерозойских микроконтинентов возраста 2.0-2.1 млрд лет или даже

древнее: разрушение этих гипотетических микроконтинентов привело к появлению детритовых цирконов, которых в парагнейсах орогена почти 2/3 [Nuhma et al., 1991].

Важной характеристикой СО является преимущественно ювенильная природа вещества протерозойской коры и отсутствие геологических, петрологических и изотопно-геохимических свидетельств существования пород архейского комплекса в основании новообразованного блока свекофеннид. Древний (архейский) коровый материал в породах СО орогена известен только в виде детритовых цирконов, обрастающих в большинстве случаев каймами этого же минерала, но протерозойского возраста. Легко диагностируемые архейские породы (в большинстве случаев – гранито-гнейсы и породы TTG серий) дают возможность уверенно провести границу между новообразованным протерозойским блоком свекофеннид и окраинной областью архейского континента. Также одним из главных изотопно-геохимических параметров, позволяющим отделить блок свекофеннид от области развития пород, где встречаются как протерозойские, так и архейские породы, является величина ϵNd в одновозрастных плутонических породах [Öhlander et al., 1993].

Но кроме геохронологических, изотопно-геохимических характеристик пород важную роль играют геологические и петрологические свидетельства, указывающие на древнюю конвергентную границу. Такие данные были получены на территории Северного Приладожья, где зона стыка пород СО орогена и Карельского кратона (КК) наиболее хорошо обнажена в береговой зоне Ладожского озера и детально изучена. Здесь выявлены признаки полистадийного надвигания пород СО на КК с проявлением давления в надвиговой зоне, превышающим литостатическое [Балтыбаев и др., 2022].

Все породы в передах СО метаморфизованы в условиях от зеленосланцевой до гранулитовой фации метаморфизма. На основе геологических наблюдений и геохронологических данных в пределах СО можно выделить два крупных этапа эндогенной активности и метаморфизма: раннесвекофеннский и позднесвекофеннский. Раннесвекофеннский метаморфизм (1.89-1.87 млрд лет) пород северной – «внешней» зоны свекофеннид обусловлен термическими аномалиями, предположительно возникшими в обстановках надсубдукционной тектоники, и связан с подъемом магматических масс основного и среднего («андезитового») состава, характерных для этих режимов. Многочисленные габбро-эндербитовые тела, тесно ассоциированные с гранулитовыми комплексами, рассматриваются в качестве дериватов этих глубинных магматических масс. В южной Финляндии и Швеции присутствуют многочисленные массивы гранитов, которых сопровождают К-мигматиты с характеристиками продуктов переплавления метапелитов. Пик эндогенной активности для указанных комплексов мигматит-гранитной зоны датируется интервалом 1.83-1.80 млрд лет [Ehlers et al., 1993], что позволяет выделить этот этап как этап позднесвекофеннского магматизма и метаморфизма. Термические аномалии и позднесвекофеннский метаморфизм гранулитовой ступени пород внутренней зоны свекофеннид связан с коровым магматизмом.

В последние годы в ряде публикаций финских геологов (Р. Лахтинен и соавторы) стали предлагаться модели тектонического развития СО, несколько отличающиеся от ранее предложенных [Gaal, Gorbachev, 1987; Nironen, 1997]. Наиболее существенным в «новых» моделях является предположение о простирании ключевой сутуры между свекофеннидами и архейскими комплексами не на северо-запад, вплоть до Лофотеновских островов в Норвегии, а в меридиональном направлении – между кратонами Норрботтен и Карельским. Также вышеуказанные финские исследователи считают, что современная конфигурация и структуры зоны стыка между СО и КК отражают последовательное развитие ороклинов [Lahtinen et al., 2022], а не субпараллельную амальгамацию островодужных комплексов, как это считалось ранее.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГД РАН FMUW-2022-0002 Минобрнауки России



Литература

- Балтыбаев Ш. К., Вивдич Э. С., Галанкина О. Л., Борисова Е. Б.* Флюидный режим формирования гнейсов в Мейерской надвиговой зоне Северного Приладожья (юго-восток Фенноскандинавского щита) // *Петрология*. 2022. Т. 30. № 2. С. 166–193.
- Ehlers C., Lindroos A., Selonen O.* The late Svecofennian granite-migmatite zone of southern Finland - a belt of transpressive deformation and granite emplacement // *Precambrian Research*. 1993. V. 64. P. 295–309.
- Gaál G., Gorbatshev R.* An outline of the Precambrian evolution of the Baltic Shield // *Precambrian Research*. 1987. V. 35. № 1. P. 15–25.
- Hietanen A.* Generation of potassium-poor magmas in the northern Sierra Nevada and the Svecofennian in Finland // *J. Res. US Geol. Surv.* 1975. № 3. P. 631–645.
- Huhma H., Claesson S., Kinny P.D., Williams I.S.* The growth of the Early Proterozoic crust: new evidence from Svecofennian detrital zircons // *Terra Nova*. 1991. V. 3. № 2. P. 175–179.
- Kontinen A.* An early Proterozoic ophiolite - the Jormua mafic-ultramafic complex, northeastern Finland // *Precambrian Research*. 1987. V. 35. P. 313–341.
- Lahtinen R., Salminen P.E., Sayab M., Huhma H., Kurhila M., Johnston S.T.* Age and structural constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Saimaa orocline in Fennoscandia // *Precambrian Research*. 2022. V. 369. doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106477
- Nironen M.* The Svecofennian Orogen: a tectonic model // *Precambrian Research*. 1997. V. 86. № 1-2. P. 21–44.
- Öhlander B., Skiöld T., Elming S.-A., BABEL Working Group, Claesson S., Niska D.H.* Delineation and character of the Archaean–Proterozoic boundary in northern Sweden // *Precambrian Research*. 1993. V. 64. P. 67–84.
- Park A.F.* Accretion tectonism in the Proterozoic Svecokareliides at the Baltic Shield // *Geology*. 1985. V.13. № 10. P. 725–729.



УДК 551. 248.1

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИКИ НЕОПРОТЕРОЗОЯ

Н. А. Божко

Московский Государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия, bozhko@yandex.ru

Рассматриваются некоторые особенности геодинамики неопротерозоя: формирование суперконтинентов, изменение характера субдукции, увеличение площади континентальных плит и скорости их движения, проявление асимметрии в тектоническом развитии Северного и Южного полушарий. Эти изменения в значительной степени предопределили переход к современному стилю геодинамики и новым глобальным экологическим, биогеохимическим и другим условиям.

Ключевые слова: геодинамика, Паннотия, суперконтинент, субдукция, Гондвана

SOME FEATURES OF NEOPROTEROZOIC GEODYNAMICS

N. A. Bozhko

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Some features of the geodynamics of the Neoproterozoic are considered: the formation of supercontinents, changes in the nature of subduction, an increase in the area of continental plates and the speed of their movement, the manifestation of asymmetry in the tectonic development of the Northern and Southern hemispheres. These changes largely predetermined the transition to the modern style of geodynamics and new global ecological, biogeochemical and other conditions.

Keywords: geodynamics, Pannotia, supercontinent, subduction, Gondwana.

Существующие различия в геодинамике между фанерозоем и докембрием подготавливались в течение всей эволюции последнего. Каждый этап вносил в нее свои изменения. В этом отношении неопротерозой занимает особое место. Неопротерозой продолжительностью от 1000 млн лет до 541 млн лет, непосредственно предшествуя фанерозою, многими исследователями рассматривается как самый революционный период в истории Земли. В это бурное время планета испытывала ряд изменений, которые в значительной степени предопределили переход к современному стилю геодинамики и новым глобальным экологическим, биогеохимическим и другим условиям.

Основное тектоническое содержание неопротерозоя выразилось в развитии новых суперконтинентов Родинии и Паннотии. Нижний неопротерозой по времени соответствует существованию и распаду Родинии сформировавшейся в Гренвильскую эпоху (около 1000 млн лет). С этим рубежом связаны значительные изменения в геодинамике Земли. Суперконтинент Родиния раскололся на северную половину (Восточная Гондвана, Катазия и Киммерия) и южную (Лаврентия, Амазония -Северо-Западная Африка, Балтика и Сибирь), с этой эпохой связано и раскрытие Тихого океана.

Фрагменты Родинии были объединены в новый суперконтинент. Развитие полифазной Пан-Африканской орогении привело к формированию около 650 млн лет тому назад крупного древнего материка Гондвана, объединявшего ныне разобщенные континенты южного полушария и Индию. В результате кратковременного слияния Гондваны с Балтикой, Сибирью и Лаврентией был образован «вендский суперконтинент», названный Пауэллом в 1995 г. Паннотия. С развитием палеомагнитных и геохронологических данных существование этого суперконтинента и цикла начало подвергаться сомнению. Однако результаты новых исследований свидетельствуют о реальности древнего суперконтинента Паннотия [Nance, Murphy, 2018 и др.]. В кембрии произошел распад Паннотии и окончательное обособление Гондваны как наиболее крупного его фрагмента.

В неопротерозое произошли изменения в стиле развития коллизионных орогенов, выразившиеся в частности в появлении в позднем неопротерозое метаморфических пород голубосланцевой фации и ультравысокого давления, отсутствовавших в более древних поясах, что указывает таким образом на переход к режиму современной субдукции. Среди существующих объяснений этому наиболее предпочтительным представляется подход, принимающий во внимание охлаждение Земли во времени [Grown, 2008 и др.]. На уровне 1 млрд лет температура верхней мантии была еще на 150-100С выше чем сейчас, что препятствовало значительному погружению субдукционного слэба. Охлаждение Земли в неопротерозое создало условия благоприятные для переход к холодной, глубокопроникающей и крутопадающей субдукции, что отразилось в появлении указанных пород. Результаты 2-D числового моделирования континентальной коллизии [Sizova et al., 2014] подтверждают эти представления. Увеличение температуры в опытах на 80-100 градусов, что соответствует условиям протерозоя привело к тектонике в условиях неглубокой субдукции.

Увеличение размеров континентальных фрагментов в ходе суперконтинентальной цикличности достигло в неопротерозое появления мегаконтинентов. Эволюция суперконтинентальной цикличности характеризуется увеличением площади суперконтинентов и их составляющих фрагментов во времени. Суперконтиненты архея формировались за счет слияния континентальных плит небольшого размера. Формирование суперконтинентов сопровождалось увеличением их размеров за счет прогрессивного новообразования континентальной коры в процессе их сборки. В неопротерозое этот процесс достиг такой степени, когда начали формироваться гигантские мегаконтиненты типа Гондваны. Это имело следствия для геодинамики в плане расширения условий для создания термоизоляционного экрана и плюмообразования. Формирование ареалов континентальной коры больших размеров сопровождалось увеличением их мощности прежде всего за счет андерплейтинга базальтовой магмы.

В неопротерозое отмечено увеличение скорости перемещения континентов в ходе суперконтинентальной и цикличности. Для позднего протерозоя и среднего кембрия для крупных континентов Лаврентии и Гондваны была установлена чрезвычайно значительная скорость движения (до 24 см в год) [Meert et al., 1997]. Для объяснения этого быстрого движения был предложен ряд механизмов. Наиболее эффективной представляются модели, основанные на привлечении теплоизоляционного эффекта («одеяла»), возникающего под континентальной плитой достаточного размера, приводящий к увеличению общей теплоты мантии, увеличению плавучести континентальной плиты над ней и запуск плюмов нижней мантии. Этот процесс компенсирует отсутствие выходов теплового потока в виде срединно-океанических хребтов, возникающее из за отсутствия их после создания суперконтинента. Гондвана могла служить в качестве такого мантийного изолятора, размеры которого благоприятствовали возникновению плюмов. Таким образом, рассматриваемая особенность геодинамики неопротерозоя и отмеченная выше являются взаимосвязанными

Проявление антисимметрии в геодинамической системе Северного и Южного полушарий проявилось в неопротерозое особенно выразительно.

Оно выразилось в контрастах их тектонической активности [Божко.2009]. Распад Родинии локализовался в основном в пределах южной полушария и привел к новообразованию океанических бассейнов (Гойянского, Хоггаро-Атакорского, Адаматор, Палео-Азиатского и др.), так и интракратонных прогибов (Дамаро-Катангского и др.). Их замыкание в эпоху Панафриканской орогении (около 600 млн лет) привело к слиянию всех южных континентальных фрагментов в мегаконтинент Протогондвана. В Лавразии орогения синхронная Пан-Африканской практически не проявилась, на что обратил внимание Н.А. Штрейс еще в 60 е годы. Таким образом, Лавразия, в основном оставалась относительно монолитным фрагментом после распада Родинии. В результате слияния обломков Родинии между собой и новообразованной Гондваной возник «вендский суперконтинент» Паннотия. Примечательно отсутствие авлакогенной стадии в эволюции неопротерозойских платформенных чехлов Гондваны. Распад Паннотии к началу кембрия привел к полному обособлению



монолитной Гондваны и активному расколу Лавразии на континенты Лаврентия, Балтика и Сибирь, разделенные новообразованными океанами.

В неопротерозое отмечены глобальные изменения в процессах металлогении. Тектонические события в тектонике неопротерозоя нашли отражение в формировании ряда полезных ископаемых, что представляет особую тему для анализа. Хорошим примером может служить роль неопротерозоя в истории алмазоносного магматизма [Божко, 2019]. На рубеже около 1 млрд лет в распространении кимберлитового магматизма имел место скачок, сопровождавшийся образованием первого промышленного месторождения Премьер. При этом, 95% датированных имберлитов оказываются моложе 750 млн, хотя редкие проявления фиксируются до архея включительно. Этот процесс проходил на фоне охлаждения мантии, что создавало благоприятные геодинамические и петрологические условия для извлечения алмазоносных кимберлитов, в частности, отмеченные выше изменения в стиле субдукции. Одним из факторов, способствовавшим данной тенденции могло быть также указанное выше прогрессирующее увеличение площади континентальной коры в ходе суперконтинентальной цикличности.

Неопротерозой – бурное время глубоких экологических, биогеохимических, климатических изменений, включая химию воды в океанах, развитие нескольких оледенений, появление и исчезновение эдиакарской фауны и другие. Они происходили на фоне отмеченных глобальных тектонических событий и были обусловлены ими. Вместе с тем, эти события далеко не изучены полностью и неопротерозой представляет собой неисчерпаемый объект для будущих исследований.

Литература

- Божко Н.А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 13–27
- Божко Н.А. Алмазоносный магматизм в суперконтинентальных циклах // Руды и металлы. 2019. №3. С. 22-27
- Meert, J. G., Van der Voo, R., Powell, C. McA., Li, Z. X., McElhinny, M. W., Chen, Z. and Symons, D.T.A., 1997. A plate tectonic speed limit?, *Nature*, 363, 216-217.
- Nance R. Damian, Murphy J. Brendan. Supercontinents and the case for Pannotia. Geological Society, London, Special Publications, 2018; DOI: 10.1144/SP470.5
- Brown, M., 2008. Characteristic thermal regimes of plate tectonics and their metamorphic imprint throughout Earth history: when did Earth first adopt a plate tectonics mode of behavior? In: Condie, K.C., Pease, V. (Eds.), *When Did Plate Tectonics Begin on Planet Earth? : Geological Society of America Special Paper*, vol. 440, pp. 97–128.
- Sizova E., Gerya T., Brown M., 2014. Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision. *Gondwana Research*, 25(2), 522-545 <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.011>

УДК 551.24.03

КРУПНАЯ ЗОНА РАСТЯЖЕНИЯ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

И. В. Бондарь, А. В. Маринин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, bond@ifz.ru

На основании полевых замеров пространственной ориентировки геологических стресс-индикаторов с помощью тектонофизических методов (метод катакластического анализа разрывных смещений и структурно-парагенетический метод) в юго-западной части Кольского полуострова зафиксирована крупная зона растяжения, находящаяся на продолжении структуры Кандалакшского грабена, и, вероятно, связанная с развитием грабена как региональной структуры растяжения.

Ключевые слова: зеркала скольжения, Кандалакшский грабен, геодинамические типы, зона растяжения, сейсмичность

LARGE STRETCHING ZONE IN THE SOUTHWESTERN PART OF THE KOLA PENINSULA

I. V. Bondar, A. V. Marinin

Schmidt Institute of Earth Physics of the RAS, Moscow, Russia

Based on field measurements of the spatial orientation of geological stress indicators using tectonophysical methods (the method of cataclastic analysis of discontinuous displacements and the structural-paragenetic method), a large stretching zone was recorded in the southwestern part of the Kola Peninsula, located on the continuation of the structure of the Kandalaksha graben, and probably associated with the development of the graben as a regional stretching structure.

Keywords: slickenside, Kandalaksha graben, geodynamic types, stretching zone, seismicity

Введение

Кандалакшская сейсмогенная зона маркирует крупную зону растяжения в земной коре [Юдахин и др., 2003]. Растяжение и, следовательно, распределение напряжений в Кандалакшском заливе объясняется противоположной направленностью вращения Кольского и Карельского массивов. На этот процесс накладываются глициоизостатические деформации [Евзеров и др., 2014].

Формирование современного бассейна Белого моря, а следовательно и Кандалакшского залива, имеет структурно-тектоническую предопределенность. Тектоническая впадина современного залива наследует или возрождает рифейский грабен, о чем свидетельствуют активные опускания в новейшее время, сопровождаемые возрождением большинства разломов и проявлением вдоль них многочисленных очагов землетрясений [Балуев и др., 2012]. Начав свое развитие в рифее, Кандалакшский грабен вплоть до наших дней оказывает влияние на некоторые области Кольского полуострова. Это влияние и будет рассмотрено в данной работе.

Методика и исходные данные

Авторами данной статьи совместно с коллегами из различных научных институтов набран обширный тектонофизический материал о пространственном положении геологических стресс-индикаторов: зеркал скольжения, отрывов, жил, трещин и других. Имеются данные по южному побережью Кандалакшского залива (острова Кузокоцкого архипелага), побережьям озер Большая Имандра, Экоостровская Имандра, Бабинская Имандра, Колвицкое, окрестностям города Кандалакши и села Ёна.

Реконструкция напряженно-деформированного состояния проводится по данным полевых замеров. Для реконструкции используется программа STRESSgeol, разработанная в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН. Метод катакластического анализа позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний: положение осей главных напряжений и коэффициент Лодэ–Надаи [Ребецкий и

др., 2017]. Структурно-парагенетический метод применен для анализа систем тектонической трещиноватости разных кинематических типов с их объединением в устойчивые структурные ассоциации (парагенезы) [Расцветаев, 1987]. Малые разрывные нарушения, зеркала скольжения, отрывы, жилы и другие, используемые в данном методе геологические стресс-индикаторы, несут информацию о разных этапах деформирования.

Результаты исследования и обсуждение

Всего удалось получить расчеты для 15 точек наблюдения. В большинстве случаев ось максимального растяжения ориентирована на северо-восток или юго-запад и в основном имеет небольшой угол относительно горизонта. Ось максимального сжатия ориентирована или на северо-запад или на северо-восток, в некоторых точках наблюдения на восток или запад, при этом угол погружения встречается от пологого до крутого. Промежуточная ось как правило вертикальна.

По сравнению с меняющимися по азимуту и погружению ориентировками осей главных напряжений более устойчив и информативен тип напряженного состояния, определяемый по положению осей на зенит. По результатам реконструкции установлено, что для рассматриваемого района преобладают обстановки горизонтального растяжения и горизонтального сдвига. Обстановки горизонтального сжатия не зафиксированы.

Это может быть объяснено следующим образом.

Образовавшись в рифее Кандалакшский грабен на протяжении длительного времени своего развития оказывал влияние на юго-западную часть Кольского полуострова, проникая все дальше вглубь него. Сам Кандалакшский грабен является структурой растяжения и соответственно генерировал растягивающие напряжения в юго-западной части Кольского полуострова. Возраст полученных авторами геологических стресс-индикаторов неизвестен, однако очевидно, что влияние Кандалакшского грабена распространялось в голоцене, а также и в современное время, о чем говорит большое количество сейсмодислокаций в этой области [Авенариус, 2008; Николаева, 2019] и современная сейсмичность.

Современная сейсмичность Беломорского региона проявляется в виде землетрясений небольшой магнитуды от 0,5 до 2,9 [Морозов и др. 2019]. Распределение эпицентров зарегистрированных землетрясений имеет следующий характер: повышенная сейсмическая активность наблюдается в западной части бассейна, а слабая активность в восточной и центральной частях.

В западной части Беломорского региона большинство эпицентров располагается не в пределах Кандалакшского грабена, а на суше к западу и юго-западу от него с гипоцентрами на глубине до 5 и до 20 км.

В связи с этим есть все основания выделить крупную зону растяжения в юго-западной части Кольского полуострова на продолжении Кандалакшского грабена.

Выводы

В центральной части Кольского полуострова установлена зона деформаций северо-западного простирания, в которой преобладают обстановки горизонтального сдвига и растяжения.

Данная зона связана, вероятнее всего, с развитием Кандалакшского грабена.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН

Литература

Авенариус И. Г. Морфоструктурный анализ при изучении культурного и природного наследия Западно-Арктического региона России. М.: Paulsen, 2008. С. 36, 166

Балуев А. С., Журавлев В. А., Терехов Е. Н., Пржиялговский Е. С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий» масштаба 1:1500000) // Тр. ГИН РАН. М.: ГЕОС. Вып. 597. 2012. 104 с.



Евзеров В. Я., Виноградов А. Н., Николаева С. Б. Геодинамика беломорской котловины в голоцене // Вестн. КНЦ РАН. 2014. № 2 (17). 2014. С. 51-58.

Иващенко В. И., Голубев А. И. Новые аспекты металлогении скарнов Питкярантского рудного района // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 127–148. doi: 10.17076/geo149

Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э. Современная сейсмичность Беломорского региона // Вулканология и сейсмология. № 1. 2019. С. 36-51.

Николаева С. Б. Послеледниковая тектоника и палеосейсмодислокации в районе участка Ковды (Кандалакшский залив Белого моря) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. № 64 (3). С. 434–453. Doi: 10.21638/spbu07.2019.304

Расцветаев Л. М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР. 1987. С. 173–235.

Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. ГЕОС Москва. 2017. 225 с.

Юдахин Ф. Н., Щукин Ю. К., Макаров В. И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН. 2003. 299 с.



УДК 550.384

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ И ГЕОХРОНОЛОГИЯ АРХЕЙСКИХ ДАЕК КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА: ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

**Р.В. Веселовский^{1,2}, А.В. Самсонов³, А.В. Степанова⁴, Е.Б. Сальникова⁵,
А.А. Арзамасцев⁵, С.В. Егорова⁴, К.Г. Ерофеева³, М.В. Стифеева⁵, В.П. Щербаков⁶,
В.В. Щербакова⁶**

¹МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия, roman.veselovskiy@ya.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

³Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

⁴Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

⁵Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁶Геофизическая обсерватория «Борок», филиал ИФЗ РАН, пос. Борок, Россия

Мы представляем результаты палеомагнитных и геохронологических исследований неархейских даек, обнажающихся в пределах Мурманского кратона (Кольский полуостров). Изученные нами дайки, в большинстве своём, сохранили первично-магматические минеральные ассоциации, а их изотопный возраст оценён несколькими методами (U-Pb по бадделеиту, Sm-Nd, Rb-Sr, Ar/Ar), что определяет их как перспективный объект для палеомагнитных исследований с целью построения палеотектонических реконструкций Мурманского кратона, а также для оценки напряженности геомагнитного поля в указанные интервалы геологического времени.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа; Кольский полуостров, докембрий; палеомагнетизм; геохронология; геодинамические модели.

PALEOMAGNETISM AND GEOCHRONOLOGY ARCHEAN DYKES OF THE KOLA PENINSULA: GEODYNAMIC CONSEQUENCES

**R.V. Veselovskiy^{1,2}, A.V. Samsonov³, A.V. Stepanova⁴, E.B. Salnikova⁵, A.A. Arzamastsev⁵,
S.V. Egorova⁴, K.G. Erofeeva³, M.V. Stifeeva⁵, V.P. Shcherbakov⁶, V.V. Shcherbakova⁶**

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia

³Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia

⁴Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

⁵Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, Saint Petersburg, Russia

⁶Geophysical Observatory "Borok" IPE RAS, Russia

We present new results on paleomagnetism and geochronology from the Kola Peninsula dykes of Neoproterozoic age, which are located within the Murmansk craton area. Almost all studied dykes preserved primary mineralogical associations and their isotopic age was estimated by a few methods (U-Pb by baddeleyite, Sm-Nd, Rb-Sr, Ar/Ar), that defines these dykes as a very perspective for paleotectonic and paleointensity studies.

Key words: East European Platform; the Kola Peninsula; Precambrian; paleomagnetism; geochronology; geodynamic models

В пределах северо-восточной части Кольского полуострова, в тектоническом плане относящейся к Мурманскому кратону, широко распространены крупные рои даек и пластовых интрузий девонского,

палеопротерозойского и неoarхейского возраста. С 2009 года нами были получены палеомагнитные характеристики для 105 разновозрастных даек, а для ключевых объектов выполнены современные изотопно-геохронологические исследования. Благодаря полученным данным, архейские и палеопротерозойские дайки Кольского полуострова являются весьма перспективными объектами для целей построения палеотектонических реконструкций и оценки напряженности магнитного поля Земли в прошлом, однако задача получения палеомагнитных определений по дайкам с возрастом древнее 1.86 млрд лет до сих пор остается актуальной. Это связано с тем, что даже в наименее затронутых вторичными процессами дайках архейского возраста, время внедрения которых надежно устанавливается U-Pb датированием по бадделиту, выделяется только одна стабильная компонента естественной остаточной намагниченности, время образования которой, по аналогии с надежно определенным палеомагнитным направлением пойкилоофитовых силлов Мурманского кратона, составляет 1.86 млрд лет [Veselovskiy et al., 2019], т.е. с большой степенью вероятности отвечает времени проявления перемагничивающего события.

Представленные в данной работе палеомагнитные данные получены по породам наиболее мощной (20 м) и сохранный дайки в районе мыса Лицкий, зона закалки которой представлена оливиновыми порфиритами, а внутренние части дайки сложены среднезернистыми массивными оливиновыми габброноритами. По пробе, отобранной из центральной части дайки, получен U-Pb (ID-TIMS) конкордантный возраст по бадделиту, составивший 2680 ± 2 млн лет.

Температурные магнитные чистки и чистки переменным магнитным полем выявили, что направление наиболее стабильной компоненты намагниченности центральной части (около 5 метров мощностью) и краевых частей дайки различаются. Для краевых, наиболее измененных частей дайки, среднее направление стабильной компоненты намагниченности составляет $D=342^\circ$, $I=47^\circ$, $K=77$, $a95=4.2^\circ$, $N=16$ (компонента А) и отвечает палеомагнитному направлению с возрастом 1.86 млрд лет [Veselovskiy et al., 2019]. В то же время, среднее направление стабильной компоненты намагниченности центральной, максимально сохранный части дайки составляет $D=134^\circ$, $I=-78^\circ$, $K=358$, $a95=1.9^\circ$, $N=17$ (компонента Б). Палеомагнитные направления, соответствующие направлению компоненты Б, для Фенноскандии неизвестны, поэтому есть основания предполагать, что компонента Б является древней. Время ее образования на данном этапе исследований мы можем определить не точнее, чем в интервале 2.68-1.86 млрд лет. Дополнительным доводом в пользу первичности этой компоненты можно рассматривать данные по анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ): распределение осей эллипсоида магнитной восприимчивости в центральной части дайки соответствует нормальному типу магнитной текстуры, характерному для даек и коррелирует с простиранием дайки, в то время как ориентировка осей эллипсоида АМВ краевых (перемагниченных) частей дайки хаотична, что нередко является свидетельством воздействия на породу перемагничивающих факторов.

Виртуальный геомагнитный полюс, соответствующий среднему направлению компоненты Б, имеет координаты $pl_{lat}=73^\circ$, $pl_{long}=324^\circ$, палеоширота места внедрения дайки составляет 67° . И хотя выполнение палеорекострукции Мурманского кратона с использованием виртуального геомагнитного полюса некорректно, но можно отметить, что соответствующие палеоширотное положение и ориентировка Мурманского кратона сопоставима с таковыми для кратона Каапвааль [Lubnina et al., 2010], в пределах которого известны интрузивные образования с возрастом около 2.68 млрд лет. Принимая во внимание, что возможность близкой пространственной конфигурации кратонов Каапвааль и Мурманского предполагается для интервала времени 1.9-1.8 млрд лет [Djeutchou et al., 2019], то получение дополнительных доводов в пользу древнего возраста компоненты Б и обнаружение этой компоненты в других дайках Кольского полуострова будет, очевидно, являться ключевым для построения надёжной палеотектонической реконструкции Мурманского кратона на момент времени 2.68 млрд лет назад.

По образцам из рассмотренной дайки были выполнены эксперименты по оценке напряженности магнитного поля Земли 2.68 млрд лет назад. Эксперименты выполнялись в ГО «Борок» по методам Телье-Коэ и



Вилсона согласно современным требованиям к качеству и надёжности. Полученные результаты свидетельствуют о том, что величина виртуального дипольного момента (VDM) может быть оценена как 1.85×10^{22} А м², что в 4 раза меньше современного значения. Полученная оценка палеонапряженности, в первом приближении, согласуется с гипотезой о существенно более низком значении величины геомагнитного поля в докембрии, что имеет важные следствия для разработки геодинамических моделей формирования и эволюции ядра Земли.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 16-17-10260 и 22-27-00505, Президента РФ МД-1116.2018.5 и РФФИ 19-05-00433, а также в рамках темы государственного задания ИФЗ РАН.

Литература

Veselovskiy R.V., A.V.Samsonov, A.V.Stepanova, E.B.Salnikova, Yu.Larionova, A. Travin, A.Arzamastsev, S.Egorova, K.Erofeeva, M.Stifeeva, V.Shcherbakova, V.Shcherbakov, G.Zhidkov, V.Zakharov. 1.86 Ga Key Paleomagnetic Pole from the Murmansk craton intrusions – Eastern Murman Sill Province, NE Fennoscandia: multidisciplinary approach and paleotectonic applications // *Precambrian Research*. 2019. 324. P. 126-145.

Lubnina N., Ernst R., Klausen M., Söderlund U. Paleomagnetic study of NeoArchean–Paleoproterozoic dykes in the Kaapvaal Craton // *Precambrian Research*. V.183. 2010. Pp. 523–552.

Djeutchou C., de Kock M.O., Wabo H. A new key paleomagnetic pole for the ~1.8 Ga Kaapvaal craton: implications for the Paleoproterozoic apparent polar wander and reconstructions // *Large Igneous Provinces through Earth history: mantle plumes, supercontinents, climate change, metallogeny and oil-gas, planetary analogues*. Abstract volume of the 7 International Conference. Tomsk: CSTI Publishing house, 2019. P. 24.



УДК 553.46

ПРОЦЕССЫ НЕСМЕСИМОСТИ И ФРАКЦИОННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ВУЛКАНИТАХ ЛАДОЖСКОГО ГРАБЕНА, РОССИЯ.

А.А. Возняк, А.А. Носова, Н.М. Лебедева

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Исследование петрохимии мезопротерозойских вулканитов Ладожского грабена и обнаружение высококремнистых стекол наряду с железистыми стеклами позволяет утверждать, что на состав изучаемых пород повлияли как процессы ликвации расплава, так и фракционная кристаллизация.

Ключевые слова: Республика Карелия; докембрий; несмесимость; ферробазальты; фракционная кристаллизация; высоко-Fe расплавы.

LIQUID IMMISCIBILITY AND FRACTIONAL CRYSTALLIZATION IN MEZOPROTEROZOIC VOLCANITES OF LADOGA GRABEN, RUSSIA

A.A. Vozniak, A.A. Nosova, N. M. Lebedeva

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia

Petrochemistry research of mezoproterozoic volcanic rocks of Ladoga graben and detection of high-Si and high-Fe glasses in these rocks allow us to say, that fractional crystallization and liquid immiscibility were two main processes in these ferrobasalts.

Keyword: Karelia Republic; Precambrian rocks; immiscibility; ferrobasalts; fractional crystallization; high-Fe melts.

Природа происхождения и развития высоко-Fe расплавов в АМСГ комплексах является обсуждаемой проблемой. Согласно разным гипотезам высоко-Fe расплавы и их кумулаты могут быть как результатом фракционной кристаллизации толеитовых расплавов в восстановительных условиях, так и продуктом возникновения несмесимости в исходно одном расплаве с выделением высоко-Fe и высоко-Si расплавов [Duchesne, J. C., & Liégeois, J. P., 2015].

Ладожский грабен развился на северо-западе Восточно-Европейского кратона в области распространения мезопротерозойского магматизма АМСГ типа. В восточном борту грабена находится Салминский плутон гранитов рапакиви-кварцевых диоритов-анортозитов-габброноритов возрастом около 1.55-1.52 млн лет [Амелин и др., 1997]. В центральной части грабена находится крупный Валламский силл, сложенный феррогаббро-монцититами, а также в центральной и восточной части распространены покровы ферробазальтов возрастом 1.45 млн лет [Лубнина и др., 2010], которые и стали предметом нашего изучения.

Базальтовые потоки слагают две толщи, которые отделены друг от друга небольшой пачкой осадочных пород, суммарная мощность двух толщ составляет около 155 м, мощность отдельных потоков варьируется от первых метров до 60 метров в толщину. Для верхней части потоков характерны шлаки и лавобрекчии, для подошв характерны миндалекаменные базальты, переходящие в долериты в центральных частях потока.

Изученные нами базальты имеют преимущественно афировую структуру с вкрапленниками железистого оливина, клино- и ортопироксена, плагиоклаза, ильменита и магнетита.

Отдельно следует отметить наличие большого количества мелких глобул эмульсионного типа в интерстициях между вкрапленниками, размером до 20 мкм. Эти глобулы имеют богатый Fe состав, тогда как окружающее их стекло оказывается обеднено Fe, но насыщенно кремнеземом (до 90 вес% SiO₂), часто рядом с железистыми глобулами растут мелкие футляровидные кристаллы апатита размером до 2 мкм.

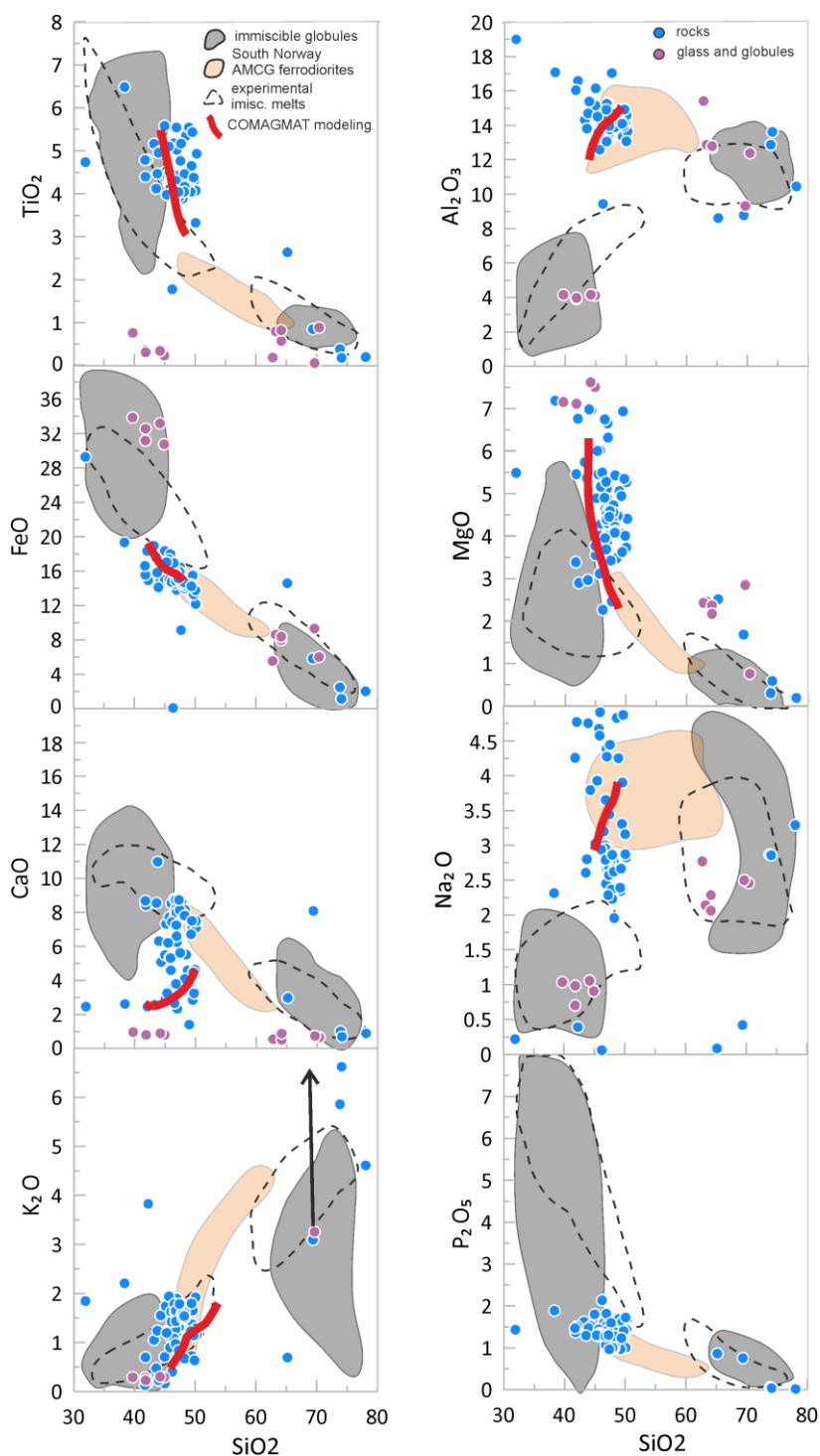


Рис. 1 Диаграммы Харкера для изученных пород, глобулей и стекол из вулканитов Ладожского грабена. Поля составов несмесимых расплавов приведены по (Duchesne, J. C., & Liégeois, J. P., 2015). Моделирование фракционной кристаллизации производилось с помощью программного обеспечения COMAGMAT (Арискин и Бармина, 2004)

Fig. 1 Harker diagram for Ladoga graben volcanites, globules and glasses. The composition fields of immiscible melts according to (Duchesne, J. C., & Liégeois, J. P., 2015). Fractional crystallization was modeled using COMAGMAT software (Ariskin and Barmina, 2004)

Петрохимический состав этих пород носит бимодальный характер: есть значительный кластер (см рис. 1) высоко-Mg низко-Si пород, отвечающих подошвам и центральным частям толщ; и есть незначительная группа высоко-Si низко-Fe пород, соответствующих верхним частям потоков.

Сравнивая составы с ранее изученными областями несмесимости, которые были выделены по результатам экспериментов и по составам природных несмесимых расплавов [Duchesne, J. C., & Liégeois, J. P., 2015] в ферробазальтах, аналогичных приведенной АМСГ ассоциации, можно увидеть, что более кислые составы попадают в область ликвидировавшихся высоко-Si расплавов и совпадают с составами высоко-Si стекла, которое было обнаружено в интерстициях ферробазальтов вместе с высоко-Fe глобулями. Все это указывает на то, что высоко-Si составы образовались в результате частичного отделения в ходе ликвации.

Составы высоко-Fe кластера часто не совпадают с зоной высоко-Fe составов из других пород и из глобулей внутри интерстиции. Мы предполагаем, что на этот кластер пород оказала значительное влияние фракционная кристаллизация пород по феннеровскому тренду, характерная для толеитов, в ходе которой происходит накопление Fe. Это подтверждается низкой фугитивностью этих расплавов [Носова и др., 202]. При попытке промоделировать [с помощью ПО COMAGMAT; Арискин и Бармина, 2004] эволюцию составов расплава в ходе фракционной кристаллизации также были получены удовлетворительные результаты (рис.1).

Подводя итоги, можно утверждать, что на вариации составов ферробазальтов Ладожского грабена влияли как несмесимость высоко-Fe и высоко-Si составов, которая обеспечивает бимодальность распределения составов, так и фракционная кристаллизация, обеспечивающая непрерывную вариацию составов внутри одного кластера.

Однако вопрос о происхождении самих ферробазальтов остается открытым. Вероятно, что ответ стоит искать в возможном метасоматизированном мантийном источнике.

Благодарности и источник финансирования. Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 27–22–318.

Литература.

Носова А.А., Лебедева Н.М., Сазонова Л.В., Возняк А.А. Проявление несмесимости между богатыми железом и кремнием силикатными расплавами в мезопротерозойских ферробазальтах Ладожского грабена, Карелия, Россия // Доклады РАН. Науки о земле. – 2022. – Т. 505. – №. 2. – С. 5–12 DOI: 10.31857/S2686739722080138

Amelin Y., Larin A., Tucker R. Chronology of Multiphase Emplacement of the Salmi Rapakivi Granite-anorthosite Complex, Baltic Shield: Implications for Magmatic Evolution // Contrib Mineral Petrol. 1997. V. 127. P. 353–368.

Ariskin A. A., Barmina G. S. COMAGMAT: development of a magma crystallization model and its petrological applications // Geochemistry International. – 2004. – Т. 42. – №. 1. – С. S1.

Duchesne J. C., Liégeois J. P. The origin of nelsonite and high-Zr ferrodiorite associated with Proterozoic anorthosite // Ore Geology Reviews. – 2015. – Т. 71. – С. 40-56.

Lubnina N.V., Mertanen S., Soderlund U., et al. A New Key Pole for the East European Craton at 1452Ma: Palaeomagnetic and geochronological Constraints from Mafic Rocks in the Lake Ladoga Region (Russian Karelia) // Precambrian Research. 2010. V. 183. No. 3. P. 442–462. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.014>

УДК 552.48+553.86+470.22

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СООТНОШЕНИЯ АРХЕЙСКИХ И ПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГЕНЕРАЦИЙ ЦИРКОНОВ ИЗ МАССИВНЫХ ЭКЛОГИТОВ О-ВА СТОЛБИХА (РАЙОН С. ГРИДИНО, БЕЛОМОРСКАЯ ПРОВИНЦИЯ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА)

О.И. Володичев, Т.И. Кузенко

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, volod@krc.karelia.ru

По данным изотопного анализа в цирконах из массивных эклогитов о-ва Столбиха выделяются три возрастные группы: короткопризматический магматический циркон – 2752 ± 16 млн лет (AR I), округлые метаморфические цирконы с включениями Omp – 2683.1 ± 7.8 млн лет (AR II) и протерозойские призматические, редкие округлые метаморфические – 1895.5 ± 9.5 млн лет (PR). Спектры распределения REE у цирконов AR I – магматический тип, у цирконов AR II – сопоставимый с эклогитовым. PR цирконы в основном были образованы за счет постепенного и полного замещения AR цирконов, и спектр распределения REE в них имеет унаследованный и, за счет пропорционального разбавления при росте дополнительной массы кристаллов, подобный характер.

Ключевые слова: эклогит, циркон, возраст, морфология, спектр распределения REE.

MORPHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL ASPECTS OF THE CORRELATION OF ARCHEAN AND PROTEROZOIC ZIRCON GENERATIONS FROM MASSIVE ECLOGITES ON STOLBIKHA ISLAND, GRIDINO AREA, BELOMORIAN PROVINCE, FENNOSCANDIAN SHIELD

O.I. Volodichev, T.I. Kuzenko

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

Isotope analysis has revealed three age groups of zircons in massive eclogites from Stolbikha Island: 1) short-prismatic igneous – 2752 ± 16 Ma (AR I); 2) rounded metamorphic with Omp inclusions – 2683.1 ± 7.8 Ma (AR II); and 3) Proterozoic prismatic, scarce rounded metamorphic – 1895.5 ± 9.5 Ma (PR). The REE distribution spectra of AR I zircons are of igneous type and that of AR II zircons is comparable with that of eclogite. PR zircons were produced mainly by gradual and complete replacement of AR zircons, and their REE distribution spectrum displays an inherited pattern, which is due to proportional dilution provoked by the growth of additional crystals.

Keywords: eclogite, zircon, age, morphology, REE distribution spectrum.

По данным изотопного анализа выделяются три возрастные группы цирконов: архейские – 2752 ± 16 млн лет (AR I) и 2683.1 ± 7.8 млн лет (AR II), протерозойская – 1895.5 ± 9.5 млн лет (PR) [Volodichev et al., 2021]. При минералогической характеристике цирконов информативными оказываются результаты их CL анализа.

Первая возрастная группа (AR I) представлена одним идиоморфным короткопризматическим кристаллом. Такая морфология предполагает его магматическое происхождение, соответствующее протолисту эклогитов. Вторая архейская группа цирконов представлена характерными для высокометаморфизованных пород гранулитовой и эклогитовой фаций кристаллами округлой формы (рис. 1, а). В двух кристаллах цирконов содержатся включения Omp [Volodichev et al., 2021].

Дальнейшая судьба архейских цирконов заключается в постепенном уменьшении их размера в ядерной части кристаллов до минимума, нередко с их фрагментацией и приобретением неправильных коррозионных форм (рис. 1, б). Размеры зон замещения постепенно увеличиваются. Светло-серые зоны присутствуют всегда, достигая в отдельных кристаллах относительно большего объема. К ним постепенно подключается, увеличивается в массе и становится доминирующей серая в CL протерозойская генерация цирконов. Конечным

наблюдаемым продуктом этого процесса являются кристаллы протерозойского возраста, содержащие в центральной части реликты цирконов ранних генераций (рис. 1, с). Иногда до окончательной стадии этого процесса округлая форма кристаллов сохраняется, но чаще кристаллы имеют призматический габитус. Вместе с тем выделяется и группа более крупных кристаллов с признаками осцилляционной зональности.

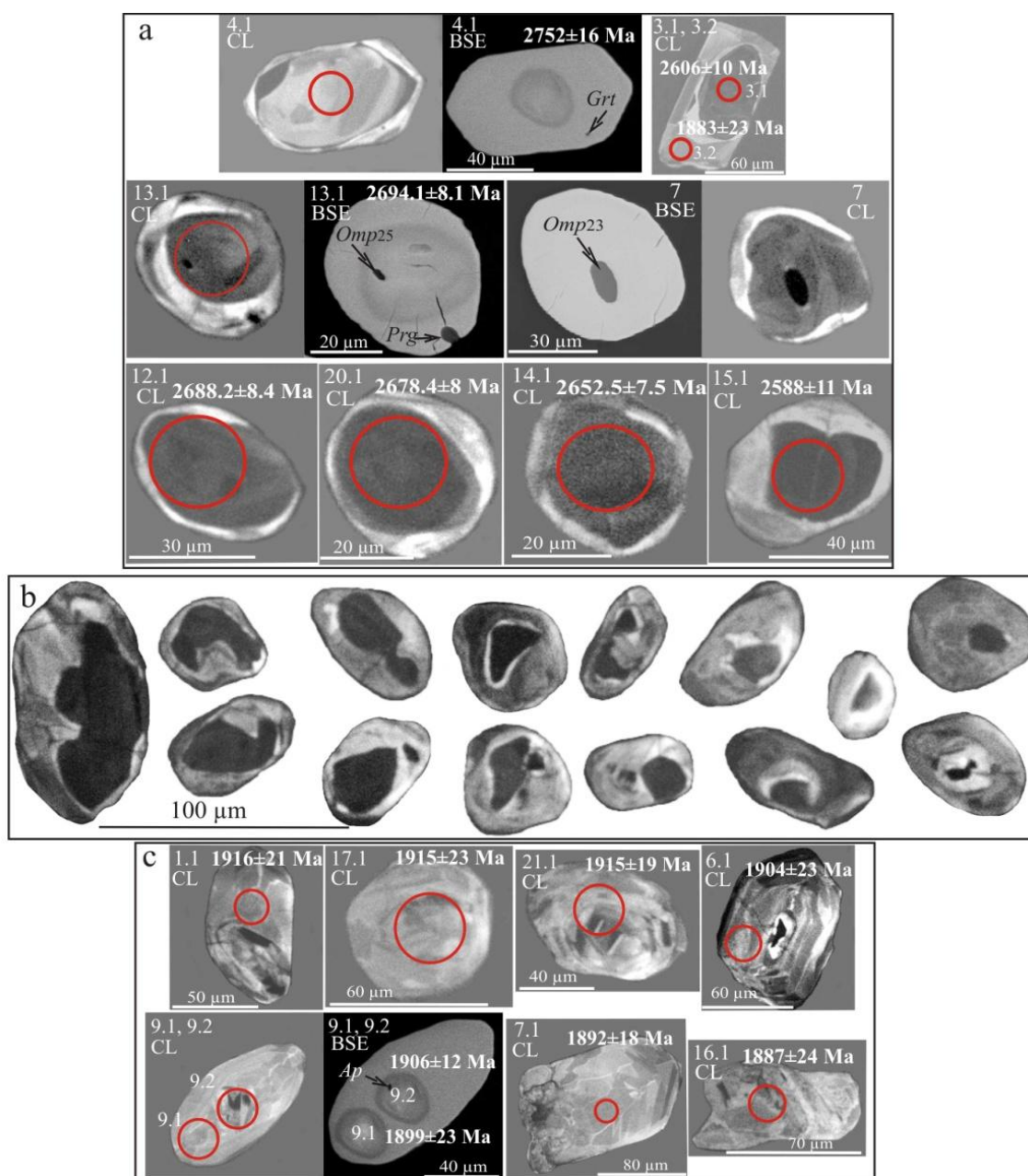


Рис. 1. а – изображения AR цирконов из массивных эклогитов о-ва Столбиха; б – различные стадии замещения архейских цирконов (черные) протерозойскими (серые) с вероятным сохранением призматической (AR I) и округлой (AR II) морфоструктур; с – изображения PR цирконов.

Fig. 1. а – images of AR zircons from massive eclogites on Stolbikha Island; б – various stages of replacement of Archean zircons (black) by Proterozoic (grey) with possible preservation of prismatic (AR I) and rounded (AR II) morphostructures; с – images of PR zircons.

Описанные взаимоотношения архейских и протерозойских цирконов дают основание полагать, что призматические протерозойские цирконы в основном, вероятно, образовались по призматическим, в первооснове AR I, цирконам, а округлые – по округлым AR II (своего рода параморфозы (?) различных стадий развития) (рис. 1, b).

Изучение закономерностей в содержаниях элементов-примесей в цирконах показало, прежде всего, различающиеся спектры распределения REE в трех возрастных группах (рис. 2). Цирконы AR I характеризуются максимальным содержанием Lu и минимальным – La. Спектры второй возрастной архейской AR II группы имеют относительно пологий наклон с меньшим содержанием Lu при больших содержаниях LREE и являются вполне сопоставимыми (рис. 2) с соответствующими критериями принадлежности к эклогитам [Rubatto, 2002]. Спектры распределения REE цирконов протерозойской группы отличаются от цирконов AR II меньшими содержаниями всего ряда REE – от Lu до La. Показательны различия архейских и протерозойских цирконов со значительным снижением в протерозойских суммарных содержаниях LREE и HREE, REE, а также Y, Th, U и Th/U отношений [Volodichev et al., 2021].

В целом соотношение спектров концентраций REE, Y, U и Th в архейских – протерозойских цирконах носит подобный характер. Учитывая изложенные ранее данные о кристаллизации части протерозойских цирконов за счет архейских и двух промежуточных генераций в качестве наиболее вероятного следует полагать, что содержания REE, Y, U и Th в протерозойских цирконах являются унаследованными. При этом их пропорциональное снижение (в 2 раза) обусловлено разбавлением при кристаллизации возросшей массы протерозойских цирконов (в основном, фракция крупных кристаллов). Дополнительное снижение концентраций в протерозойских цирконах LREE, Y, и Th может быть обусловлено переходом в условиях новой геохимической обстановки этих элементов в состав других минералов, например, в состав новообразованных кристаллов монацита или алланита (?).

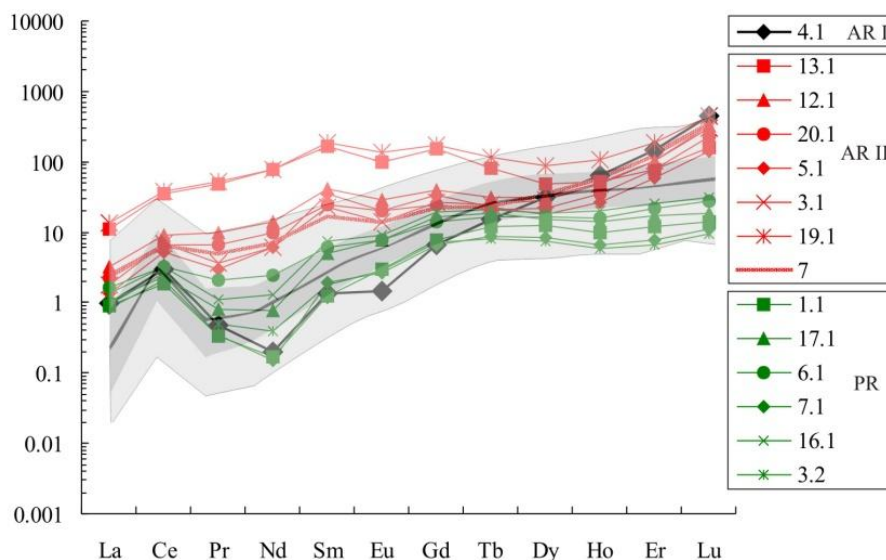


Рис. 2. Спектры распределения REE в цирконах из массивных эклогитов о-ва Столбиха на фоне генерализованных спектров распределения REE в цирконах из различных эклогитовых комплексов мира [Skublov et al., 2012].

Fig. 2. REE distribution spectra in zircons from massive eclogites on Stolbikha Island against generalized REE distribution spectra of zircons from various eclogite complexes of the world [Skublov et al., 2012].



Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГ КарНЦ РАН АААА-А18-118020290085-4.

Литература

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. <https://doi.org/10.3390/min11101029>

Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism // *Chem. Geol.* 2002. V. 184. P. 123—138.

Skublov S.G., Berezin A.V., Berezhnaya N.G. General Relations in the Trace-Element Composition of Zircons from Eclogites with Implications for the Age of Eclogites in the Belomorian Mobile Belt // *Petrology*. 2012. V. 20. № 5. P. 427—449.

УДК 552.10+552.321.5+470.22

**ПРОЦЕССЫ ЭКЛОГИТИЗАЦИИ (?) В ДАЙКАХ ОЛИВИНОВЫХ ГАББРОНОРИТОВ
(РАЙОНЫ С. ГРИДИНО И ДЕР. ПОНЬГОМА, БЕЛОМОРСКАЯ ПРОВИНЦИЯ
ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА)**

О.И. Володичев, О.А. Максимов, Т.И. Кузенко

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, volod@krc.karelia.ru

Изучение на ряде объектов метаморфизма оливиновых габброноритов Беломорской провинции выявило стадийность в развитии метаморфических преобразований, обусловленную возрастающими активностями флюидов и натрия. Отражением этого является постепенное увеличение содержаний Jd в Cpx (от 5-10 до 71-73%). Образование Omp в этом ряду, обычно обозначающее процесс эклогитизации, вероятно, является показателем высокой активности Na при возрастающей щелочности среды. Метаморфизм проходил в условиях HP гранулитовой фации в изохимической обстановке на позднемагматическом этапе кристаллизации породы с возрастом ~ 2.4 млрд лет. Постоянные ассоциации Omp с Pl исключают условия эклогитовой фации и при развитии «эклогитовых» (Grt–Omp) ассоциаций.

Ключевые слова: Беломорская провинция, габбронорит, омфациит, эклогитизация, флюид, щелочная среда.

**ECLOGITIZATION PROCESSES (?) IN OLIVINE GABBRO-NORITE DIKES NEAR GRIDINO TOWN and
PONGOMA VILLAGE, BELOMORIAN PROVINCE, FENNOSCANDIAN SHIELD**

O.I. Volodichev, O.A. Maksimov, T.I. Kuzenko

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

The metamorphic study of olivine gabbro-norites at some localities in the Belomorian Province has revealed the stepwise evolution of metamorphism triggered by increasing fluid and sodium activity and indicated by gradually increasing Jd concentrations in Cpx (5-10 to 71-73%). The formation of Omp in this sequence, commonly indicative of eclogitization, seems to indicate high Na activity provoked by the increasing alkalinity of the medium. Metamorphism took place under high-pressure granulite-facies conditions in an isochemical setting at the late magmatic stage of crystallization of ~ 2.4 Ga rock. The permanent associations of Omp with Pl also rule out eclogite-facies conditions upon the formation of «eclogitic» (Grt–Omp) associations.

Keywords: Belomorian Province, gabbro-norite, omphacite, eclogitization, fluid, alkaline medium.

Оливиновые габбронориты Беломорской провинции комплекса лерцолитов – габброноритов [Степанов, 1981] являются типичным примером широко распространенного в природе процесса преобразования габбро в эклогиты с образованием характерных коронитовых структур.

Эти породы детально были изучены в ряде объектов, отражающих возрастающую степень проявления в них метаморфических преобразований. В ходе исследований системно определялись содержания Na-компонента (Jd+Acsm*) во всех генерациях Cpx, содержаний Na в Amp (к.ф.) и в Pl (An, %), а также модальные компоненты Grt (Prp и Grs). В результате был выявлен следующий порядок эволюции метаморфического процесса:

1. Догранатовая стадия (массив о-ва Шангострова, дер. Поньгома [Степанов, 1981]). В магматических пироксенах умеренно проявлены структуры распада, а на границах пироксеновых и плагиоклазовых доменов слабо развиты прерывистые реакционные зоны Di_{4-10+} Amp, Ку состава.

* Символы минералов по [Whitney, Evans, 2010]. Цифры внизу у Di и Omp – содержание Na-компонента (Jd+Acsm); у Pl – An, %.

2. Гранатовая стадия (массив о-ва Шангострова, дайка на о-ве Эклогитовом, с. Гридино). Более интенсивно развитые реакционные зоны с Di_{6-17} и слабо-умеренно проявленная гранатизация с отчетливыми признаками дискретности в развитии этих процессов.

3. Диопсид-омфацит-плаггиоклаз-гранатовая стадия (дайка на м. Гридин). Так же хорошо проявлены признаки дискретного образования реакционных зон и граната. Сrx в реакционных зонах и во включениях в плаггиоклазовых доменах представлены $Di_{7-19} - Omp_{20-41}$, часто сосуществующие в пределах микроучастков. Pl домены, кроме Di_{7-19} и Omp_{20-41} , в различном количестве содержат включения Spl-Omp симплектитов, Amp, Bt, Spl, Spr, Ky, Crn, Aln. Гранатизация проявлена умеренно. Сосуществуют гранаты с включениями Di_{8-19} и Omp_{21-43} .

4. Омфацит-гранат-плаггиоклазовая стадия, кульминационная (дайка в с. Гридино [Володичев и др., 2008]). Еще встречаются участки Pl доменов с включениями Di_{14-15} , Omp_{25-26} , Amp, Spl, Spr, Ky, Crn, Aln и в пироксеновых доменах участки с ассоциациями Omp_{25-29} с Pl, Орх и Grt, но процесс образования Grt за счет Pl прогрессирует и за Grt-Di ассоциациями возникают Grt-Omp₂₀₋₄₀ «эклогитовые» ассоциации. В реакционных зонах, образовавшихся на границах пироксеновых и плаггиоклазовых доменов – в Сrx ($Di - Omp$) значительные вариации содержаний Jd (14-73%). Pl домены полностью преобразуются в Grt зону, содержащую включения $Omp_{23-50} + Ky$, зону Grt – Omp_{30-73} симплектитов, иногда с участками $Omp_{43-56} - Crn$ состава и центральную $Omp_{29-71} - Pl_{15-18} - Crn$ зону с единичными находками Mkt и Mtm. В магматических Сrx (до 17-19% Jd) интенсивно проявлены структуры распада с относительно высокими содержаниями Jd в ламеллях (10-18%) и в матрицах, достигая состава Omp_{19-26} . При изменениях $O1 \rightarrow Орх$ редко фиксируются фрагменты зон Di_{2-10} .

5. На регрессивной щелочной стадии (дайка на о-ве Избная луда) гранат становится нестабильным и сохраняется в виде резорбированных реликтов при интенсивных неравномерно проявленных метаморфических преобразованиях со значительным сокращением магматического компонента – пироксенов, включая Aeg-Aug и образованием сложной минеральной ассоциации Сrx (Di_{5-9} , Omp_{20-50} , Aeg-Aug с 12-18% Jd и 16-22% Acm) – $Pl_{5-15} - O1 - Amp$ (Prg, Mkt, Mtm) – Bt – Dol. Метаморфический O1 характеризуется неправильными «прорастающими» формами образования в окружении и с включениями минералов ассоциации. Для составов Сrx характерно системное присутствие Acm компонента, определяющего повышенную активность кислорода. В Omp_{27-34} содержание Acm доходит до 20%, снижаясь до 0-4% в Omp_{40-50} в преобразованных плаггиоклазовых доменах.

В метаморфизме оливиновых габброноритов преобладают два типа локально проявленных реакций – на границах пироксеновых и плаггиоклазовых доменов с образованием реакционных зон с Omp на 3-5 стадиях и процесс гранатообразования. Петрографические данные убедительно свидетельствуют о том, что эти процессы не имели тесной взаимосвязи, и образование Grt происходило позднее без генерации реакционных зон. Это дает основание полагать, что основным фактором метаморфизма в этой ситуации явились не процессы диффузии, а возрастающая от стадии к стадии активность флюидов, вероятно, в основном мантийного происхождения, образовавшихся при дегидратации Amp, выделявшегося в значительных количествах в инвертированных пироксенах. Активность флюидов инициировала активность Na, определившая щелочной характер геохимического тренда, о чем свидетельствует постепенное повышение содержаний Jd в Сrx в разных его петрографических генерациях (от 5-10 до 71-73%), содержаний Na в Amp (Prg 0.4-1.45 к.ф. до образования Mkt и Mtm) и в Pl (от 55-58% до 5-10% An). Omp в этом ряду, вероятно, является отражением высокой активности Na в щелочных условиях, а не показателем возрастающих HP условий при эклогитизации.

Большая вариативность состава минералов объясняется тем, что метаморфизм проходил в закрытой системе в спокойной обстановке, сохраняющей основные структурно-текстурные элементы породы с зональностями роста минералов, в изохимических условиях, допускающей локальные «точечные» очаги химических реакций, которые в целом создают крайне неравновесную систему, не прошедшую процесс гомогенизации. В этой ситуации процентные содержания Jd в Сrx зависят от главного источника Na –



плагиоклаза, его количественного распределения в структуре породы, состава и степени сохранности. Все это исключает возможность корректного вычисления Р-Т параметров метаморфизма. Ассоциации Grt, Орх ± Ку на разных стадиях позволяют определять НР гранулитовую степень метаморфизма, вероятно, с несколько пониженными Р на догранатовой и регрессивной стадиях. В отличие от других минералов Grt на всех стадиях имеет относительно стабильный состав в объеме 40-54% Prp и 11-24% Gts при возможных ситуационных отклонениях. Постоянная ассоциация Omp₂₀₋₇₃ с Pl₄₀₋₅ исключает условия эклогитовой фации и при наличии «эклогитовых» Grt–Omp ассоциаций при полном замещении Pl гранатом. Время проявления метаморфизма, вероятно, соответствует позднемагматической стадии развития в единой последовательности с образованием структур распада в пироксенах. Метаморфизованные габбронориты в дайке на о-ве Избная луда секутся дайками двух возрастных генераций [Stepanova, Stepanov, 2010] – дайкой габброноритов второй фазы становления комплекса лерцолитов – габброноритов и дайкой коронитовых габбро с возрастом 2.12 млрд лет. В дайке (с. Гридино) с возрастом 2393±13 млн лет в цирконе с ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb возрастом 2392±11 млн лет содержатся включения Орх и Срх с 14% Jd [Володичев и др., 2012], что, вероятно, соответствует возрасту метаморфизма НР гранулитовой фации.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГ КарНЦ РАН АААА-А18-118020290085-4.

Литература

- Володичев О. И., Парфенова О. В., Кузенко Т. И. Палеопротерозойские эклогиты Беломорского подвижного пояса (об эклогитизации габбро в дайке комплекса лерцолитов–габброноритов) // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2008. Вып. 11. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. С. 37–61.
- Володичев О. И., Слабунов А. И., Сибелев О. С., Скублов С. Г., Кузенко Т. И. Геохронология, минеральные включения и геохимия цирконов из эклогитизированных габброноритов Беломорской провинции (с. Гридино) // Геохимия. 2012. № 8. С. 734–748.
- Степанов В. С. Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. Л.: Наука, 1981. 216 с.
- Stepanova A., Stepanov V. Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield // Precambrian Research. 2010. Vol. 183. N 3. P. 602-616.
- Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. P. 185–187.



УДК [550.42:546.027.22+553.3](470.22)

**МУЛЬТИИЗОТОПНЫЙ ($\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{36}\text{S}$) СОСТАВ СЕРЫ СУЛЬФИДОВ ДРЕВНИХ РУД:
ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СЕРЫ, БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И ГЕНЕЗИСА МЕСТОРОЖДЕНИЙ.**

С. В. Высоцкий, Т. А. Веливецкая, А. В. Игнатъев

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия, svys@mail.ru

Получены новые данные об изотопном ($\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{36}\text{S}$) составе древних сульфидных руд Карельского и Сибирского кратонов. Анализ изотопного состава в сульфидах *in situ* позволил сделать выводы об источниках серы при формировании архейских месторождений, биологическом влиянии на процесс образования сульфидных руд, особенностях воздействия окружающей среды (атмосферы, гидросферы) на сульфидообразование.

Ключевые слова: изотопные аномалии серы, архей, Карельский кратон, Сибирский кратон.

**MULTIISOTOPE ($\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{36}\text{S}$) COMPOSITION OF SULFUR IN SULFIDES OF ANCIENT ORES:
SIGNIFICANCE FOR DETERMINING SULFUR SOURCES, BIOGEOCHEMICAL PROCESSES AND
DEPOSIT GENESIS.**

S. V. Vysotskiy, T. A. Velivetskaya, A. V. Ignatiev

Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia

New data on the isotopic ($\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{36}\text{S}$) composition of ancient sulfide ores of the Karelian and Siberian cratons have been obtained. An *in situ* analysis of the isotope composition in sulfides made it possible to draw conclusions about the sources of sulfur during the formation of Archean deposits, the biological influence on the formation of sulfide ores, and the features of the environmental impact (atmosphere, hydrosphere) on sulfide formation.

Key words: sulfur isotope anomalies, Archean, Karelian craton, Siberian craton.

При образовании сульфидов сера может поступать из разных источников - магматических и осадочных пород, атмосферы, морской воды. Представление о геохимических резервуарах, из которых поступает сера и некоторых геохимических процессах может дать масс-зависимое фракционирование серы (MDF-S; отслеживается по изменению $\delta^{34}\text{S}$). Однако определения только $\delta^{34}\text{S}$ недостаточно для всесторонней характеристики динамических минеральных систем, в которых химические процессы, такие как растворение, осаждение, разложение жидкой фазы и окислительно-восстановительные реакции, являются изменяющимися параметрами, которые регулируют мобилизацию, перенос и осаждение металлов. Часто бывает сложно выяснить, какой из этих конкурирующих процессов вызывает изотопную изменчивость.

Открытие и теоретическое понимание масс-независимого фракционирования малораспространенных изотопов серы (^{33}S и ^{36}S) предоставило новый инструмент для изучения процессов рудообразования и источников серы в архее. Масс-независимое фракционирование серы (MIF-S; отслеживается по изменению $\Delta^{33}\text{S}$ и $\Delta^{36}\text{S}$) является химически консервативным индикатором, представляющим отклонение от процессов масс-зависимого фракционирования. MIF-S - это метка, сообщаемая молекулам серы, которые фотохимически взаимодействовали с УФ-лучами в атмосфере [Farquhar et al., 2000]. Присутствие изотопно-аномальной серы указывает на то, что сера прошла через атмосферный фотохимический цикл прежде, чем быть заархивированной в сульфидной форме в породах. Подтверждение этого процесса было получено недавно в экспериментах [Velivetskaya et al., 2019], демонстрирующих, что источник изотопных аномалий серы с архейскими характеристиками ассоциируется с фотохимическими реакциями, протекающими в бескислородной атмосфере под воздействием ультрафиолетового излучения на диоксид серы SO_2 . Т.е., MIF-S -

это процесс, который происходит в атмосфере, но также является изотопной меткой, сохраненной в архейских супракrustальных породах, где фотолитическая сера концентрировалась и накапливалась в сульфидах и сульфатах.

Это имеет важные последствия для понимания цикла серы в архее, происхождения различных микробных метаболизмов, химии гидротермальных и поверхностных вод. Комбинированные значения $\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{36}\text{S}$ и $\delta^{34}\text{S}$ позволяют распознавать атмосферные источники серы из-за образования аномальных количеств ^{33}S и ^{36}S . Нами были проведены исследования мультизиотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$, $\Delta^{33}\text{S}$ и $\Delta^{36}\text{S}$) в сульфидах месторождений возрастом $\sim 2.9\text{-}3.0$ млрд лет, расположенных в пределах Фенноскандинавского щита и на Шарьжалгайском выступе фундамента Сибирского кратона. Полученные результаты и анализ опубликованных материалов по изотопии серы позволил наметить основные тренды, запечатленные в архейских сульфидах (рис.1).

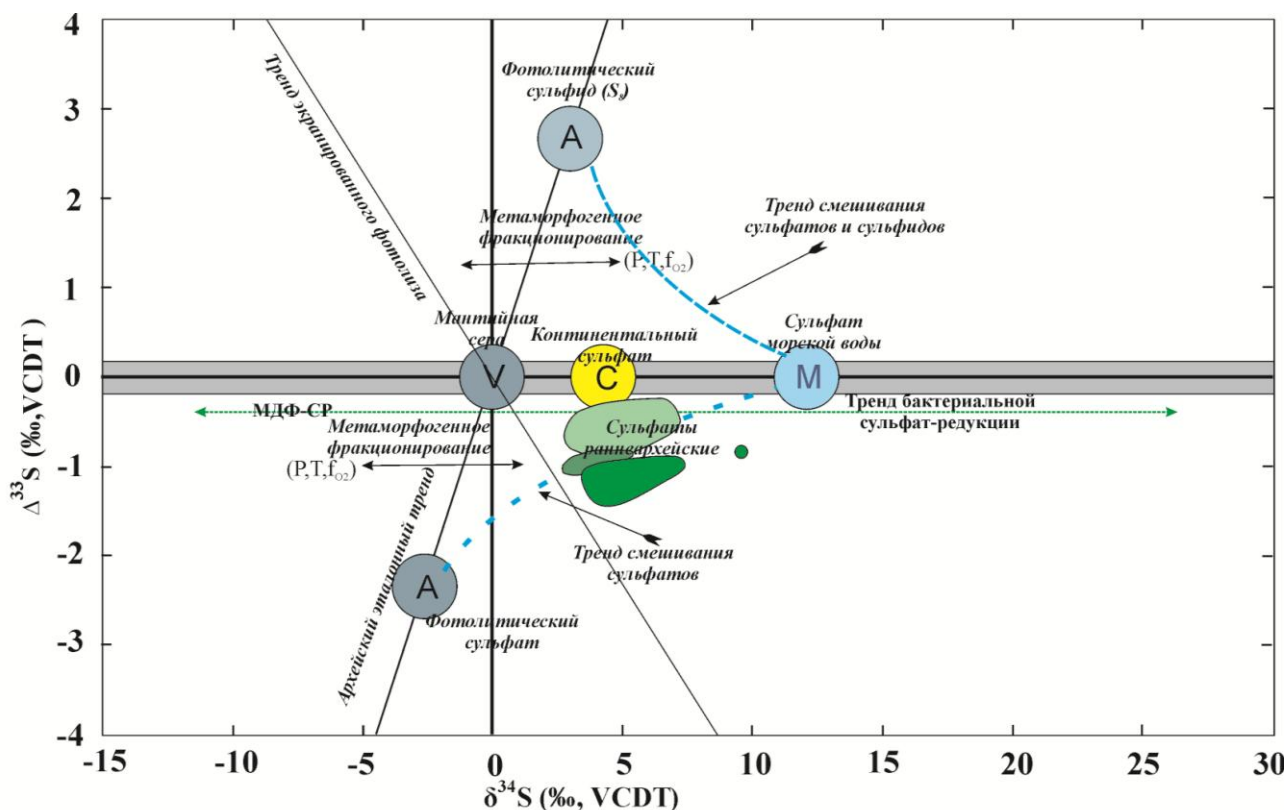


Рис.1. Резервуары изотопов серы и их влияние на составы серы архейских сульфидов.

Серая область: масс-зависимое фракционирование изотопов S ($\Delta^{33}\text{S} = 0 \pm 0,2 \text{ ‰}$); данные выше или ниже этого диапазона считаются отклонениями от масс-зависимого фракционирования (MIF). МДФ-СР - тренд масс-зависимого фракционирования в результате бактериальной сульфатредукции. Линия А-V-А - архейский эталонный тренд ($\Delta^{33}\text{S} = 0,89 \cdot \delta^{34}\text{S}$) [Ono et al., 2003]; А - атмосферная сера, V - вулканогенная сера, С - континентальный сульфат, М - сульфат морской воды. Пунктирными линиями показано смешение серы морской воды и фотолитической аэрозольной. Линия F-V-А интерпретируется как тренд экранированного фотолитического сульфида при $\lambda < 202\text{ нм}$ при фреатических кислых извержениях [Müller et al., 2016].



Проведенные нами исследования мультиизотопных характеристик сульфидной серы из архейских пород Фенноскандинавского щита и Сибирской платформы [Веливецкая и др., 2022, Vysotskiy et al. 2022] в совокупности с имеющимися изотопными данными для сульфидных образований в древних породах Африки, Австралии и Канады не оставляют сомнений в том, что процесс фотохимического круговорота серы в архейскую эру – это явление планетарного значения. Возникновение сульфидных образований в архее во многом обязано активному влиянию фотохимических процессов на трансформацию серы в ее общем геохимическом круговороте в течение всей первой половины геологической истории Земли. Изучение изотопных отношений серы, включая малораспространенные изотопы ^{36}S и ^{33}S , наиболее ярко демонстрирует генетическую значимость изотопных характеристик в идентификации и понимании источников серы, биогеохимических процессов и особенностей генезиса месторождений.

Благодарности и источник финансирования. Исследование выполнено в рамках научного проекта РФФИ № 17–05– 00469 и гранта Российского научного фонда № 21–17–00076, <https://rscf.ru/project/21-17-00076/>

Литература

- Веливецкая Т. А., Высоцкий С. В., Ханчук А. И., Игнатьев А. В., Кулешевич Л. В. Распространение изотопных аномалий серы в архее (на примере Карельского и Сибирского кратонов) // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2022. том 502. № 1. С. 8–13 doi: 10.31857/S2686739722010091
- Farquhar, J., Bao, H., Thiemens, M., 2000. Atmospheric influence of Earth's earliest sulphur cycle // Science. V 289. P. 756–758
- Muller É, Philippot P, Rollion-Bard C, Cartigny P. Multiple sulfur-isotope signatures in Archean sulfates and their implications for the chemistry and dynamics of the early atmosphere // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2016. V113. №127. P.7432-7437. doi: 10.1073/pnas.1520522113.
- Ono Shuhei, Jennifer L. Eigenbrode, Alexander A. Pavlov, Pushker Kharecha, Douglas Rumble III, James F. Kasting, Katherine H. Freeman. New insights into Archean sulfur cycle from mass-independent sulfur isotope records from the Hamersley Basin, Australia // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V 213. P. 15-30 doi:10.1016/S0012-821X(03)00295-4
- Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., and Yakovenko V. V. Mass-Independent Sulfur Isotope Fractionation in the Photochemical SO_2 Processes under the UV Radiation of Different Wave Length // Geochemistry International. 2020. V. 58. № 11. P. 1228–1238 doi: 10.1134/S0016702920110105
- Vysotskiy S.V., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Kuleshevich L.V., Slabunov A.I. Multiple Sulfur Isotope Compositions in Mesoarchean Sulfide Deposits of the Karelian Craton: Implications for Determining the Sulfur Source, Biogeochemical Processes, and Deposit Genesis // Russian Geology and Geophysics. 2022. Novosibirsk State University. Available online in May. P. 1–18. doi:10.2113/RGG20214413



УДК 550.4; 550.93

**РЕЛИКТЫ РАЗРУШЕННЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ОСТРОВНЫХ ДУГ В
ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОМ ВЯТСКОМ ОРОГЕНЕ (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ КРАТОН)**

**К.Г. Ерофеева^{1,2}, А.В. Самсонов¹, Т.А. Пилицына¹, А.Н. Ларионов³, В.А. Спиридонов⁴,
А.В. Постников⁵, А.Ю. Вовшина³, А.С. Дубенский²**

¹ *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, xenin.erofeeva@ya.ru*

² *Геологический институт РАН, Москва, Россия*

³ *Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия,*

⁴ *ВНИИ Геосистем, Москва, Россия*

⁵ *РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия*

В докладе на основе изучения раннедокембрийских метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород Вятского пояса, северо-восток Волго-Уральского мегаблока, Восточно-Европейский кратон, будут рассмотрены вопросы тектонических обстановок формирования этого пояса и его места в палеоконтинентальных корреляциях 2.2-2.0 млрд лет назад.

Ключевые слова: Восточно-Европейский кратон, Волго-Уралия, орогены, островные дуги

**RELICTS OF DESTROYED OCEANIC ISLAND ARCS IN THE PALEOPROTEROZOIC VYATKA
OROGEN (EAST-EUROPEAN CRATON)**

**K.G. Erofeeva^{1,2}, A.V. Samsonov¹, T.A. Pilitsyna¹, A.N. Larionov³, V.A. Spiridonov⁴, A.V. Postnikov⁵,
A.Yu. Vovshina³, A.S. Dubenskiy²**

¹ *Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia*

² *Geological Institute of the RAS, Moscow, Russia*

³ *Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia*

⁴ *VNIIGeosystem, Moscow, Russia*

⁵ *Gubkin State University of Oil and Gas, Moscow, Russia*

On the basis of the study of Early Precambrian metamorphosed volcanogenic-sedimentary rocks of the Vyatka belt of the northeastern Volga-Ural megablock, East European craton, the report will consider the tectonic setting of the formation of this belt and its place in the paleocontinental correlations 2.2-2.0 Ga ago.

Key words: East European craton, Volgo-Uralia, orogens, oceanic island arcs

Вятский пояс выделен по результатам бурения и оконтурен по геофизическим данным как крупная вулканогенно-осадочная структура, зажатая между архейским гранито-гнейсовыми блоками [Bogdanova et al., 2016]. Вятский пояс слагают *Hbl-Bt* гнейсы, сохранившие *Pl*-порфиоровую структуру и образованные за счет вулканогенного протолита, и *Crd-Sil-Grt-Bt* гнейсы первично осадочного происхождения. Эти вулканогенно-осадочные породы, объединяемые в унийскую свиту, прорваны жилами гнейсовидных *Ms-Bt* трондьемитов талицкого комплекса мощностью от первых сантиметров до 5 метров.

По составу метавулканиты отвечают известково-щелочным высокоглиноземистым андезитам и дацитам калинатрового ряда ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$), имеют сильно обогащенные спектры легких РЗЭ, умеренно фракционированные спектры тяжелых РЗЭ и отрицательные аномалии Sr, Eu, Ti и всех HFSE. Метаосадочные породы отвечают грауваккам и по содержаниям большинства главных и редких элементов близки к метавулканитам, которые могли служить их источником.

U-Pb изотопное датирование циркона из метавулканитов и метаосадков в разных частях пояса дает близкие спектры возрастов с 3 главными пиками. Циркон с возрастом 2.10 млрд лет доминирует в метавулканитах (>90%) и составляет до 70% популяции в метаосадочных породах, что служит еще одним аргументом в пользу образования осадков за счет разрушения смежных вулканических построек. Циркон с возрастом 2.14 млрд лет составляет до 15% популяций во всех пробах метаосадочных пород, что указывает на присутствие в Вятском поясе еще одного, пока что не обнаруженного, источника палеопротерозойского магматического циркона. Циркон с возрастом 2.05 млрд лет, найденный во всех породах в виде кайм обрастания и мелких кристаллов, мог образоваться при внедрении *Ms-Vt* трондьемитов, возраст которых оценен 2.05 млрд лет. Радиогенный изотопный состав Nd в метавулканитах ($\epsilon_{Nd}(2100) = 3.2 \pm 0.2$) указывает на ювенильный источник магм. Более низкие величины $\epsilon_{Nd}(2100) = 2.5 \pm 0.3$ в метаосадочных породах свидетельствуют о небольшом вкладе более древнего материала, что согласуется с находками в них единичных архейских зерен циркона.

Весь комплекс данных дает убедительные свидетельства об образовании пород унийской свиты Вятского пояса на удалении от архейских блоков, во внутритрокеанической надсубдукционной обстановке, при формировании двух разновозрастных островных дуг 2.10 и 2.14 млрд лет, разрушение которых с образованием граувакковых отложений могло происходить за счет субдукционной эрозии [например, Straub et al., 2020].

Близкие по геохимии флишоидные осадки с ювенильными островодужными источниками и с возрастом циркона 2.1-2.2 млрд лет слагают Волго-Донской пояс [например, Бибикова и др., 2009; Terentiev, Santosh, 2016], который располагается между Волго-Уральским и Сарматским мегаблоками [Bogdanova et al., 2016]. Восточный фланг Вятского пояса, возможно, был частью обширного палеопротерозойского орогена вместе с Батомгским поясом юго-восточной части Сибирского кратона. Такая корреляция обоснована сходством возраста корообразующих процессов этих двух поясов [Котов, 2003; Мишкин и др., 2010; Гурьянов и др., 2016; Кузьмин и др., 2016] и существующими палеоконтинентальными корреляциями [Elming et al., 2021 и ссылки в этой работе]. Полученные данные расширяют список палеопротерозойских орогенов с возрастом 2.2-2.0 млрд лет, в которых начало амальгамации отдельных архейских блоков в суперконтинент Нуна происходило на фоне главного этапа раскола архейских суперкратонов 2.2-2.0 млрд лет назад [Condie et al., 2021].

Благодарности и источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания лаборатории петрографии ИГЕМ РАН.

Литература

Бибикова Е. В., Богданова С. В., Постников А. В. и др. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракраустальных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геологическая корреляция. 2009. № 6. С. 3–16.

Гурьянов В. А., Диденко А. Н., Песков А. Ю. и др. Раннедокембрийские гранитоиды Батомгского выступа фундамента Юго-Востока сибирской платформы: возраст и геодинамическая обстановка формирования // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 3. С. 23-44.

Котов А. Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. Автореф. Дис. Д-ра геол.-минер. Наук. СПб: Изд-во СПбГУ, 2003. 78 с.

Кузьмин В. К., Богомолов Е. С., Глебовицкий В. А. Раннепротерозойский габбро-диорит-гранитный магматизм Батомгского поднятия (Северо-Восток Алданского щита) –Sm-Nd–изотопно-геохимические свидетельства // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 6. С. 707. doi: 10.7868/S0869565216060177

Мишкин М. А., Ленников А. М., Баянова Т. Б. и др. Первые результаты U-Pb геохронологических исследований докембрийских гранитоидов Батомгского блока Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 3. С. 45-49.



Bogdanova S. V., Gorbatshev R., Garetsky R. G. EUROPE | East European Craton // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier. 2016. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X

Condie K. C., Pisarevsky S. A., Puetz S. J. LIPs, orogens and supercontinents: The ongoing saga // *Gondwana Res.* 2021. V. 96. P. 105–121. doi:10.1016/j.gr.2021.05.002

Elming S. -Å., Salminen J., Pesonen L. J. Chapter 16: Paleo-Mesoproterozoic Nuna supercycle // In: Pesonen, L. J., Salminen, J., Evans, D. A. D., Elming, S. -Å., Veikkolainen, T. (Eds.), *Ancient Supercontinents and the Paleogeography of the Earth*. Elsevier, 2021. pp. 499–548. doi: 10.1016/B978-0-12-818533-9.00001-1

Straub S. M., Gómez-Tuena A., Vannucchi P. Subduction erosion and arc volcanism // *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020. V. 1. P. 574–589. doi: 10.1038/s43017-020-0095-1

Terentiev R. A., Santosh M. Detrital zircon geochronology and geochemistry of metasediments from the Vorontsovka terrane: implications for microcontinent tectonics // *Int. Geol. Rev.* 2016. V. 58. № 9. P. 1108–1126. doi: 10.1080/00206814.2016.1147386

дифференцированная андезит-дацит-риолитовая формация, во втором – бимодальная ассоциация - риолитовая и слабо дифференцированная трахибазальт-трахиандезитовая формация [Имамвердиев и др., 2017, Imamverdiyev et al., 2017, 2018].

В породах неоген-четвертичные вулканические ассоциации имеют примерно одинаковый характер распределения редких и редкоземельных элементов. На нормированных спайдер-диаграммах для основных и средних пород наблюдаются Nb, Ta, Hf и Zr минимумы. Кроме того, калиевые породы сильно обогащены Rb, Ba, Th, La и обеднены Ti, Yb, Y относительно примитивной мантии. Обогащение несовместимыми элементами предполагает, что источником расплава, из которого была получена магма, была метасоматизированная литосферная мантия, обогащенная калием и несовместимыми элементами. Наличие Nb-Ta минимума обычно считается характерной чертой надсубдукционного магматизма. В зонах субдукции, лежащий над мантийным клином, K, Rb, Th и La переходит в расплав, а Nb и Ta остается в твердых перидотитовых реститах, вызывая истощения этими элементами надсубдукционных магм [Condie, 2001]. Однако, наши образцы в отличие от базальтов островных дуг обогащены LILE. Аналогичные геохимические данные наблюдаются и в других постколлизийных областях и широко обсуждались в литературе [Dilek et al., 2010; Имамвердиев и др., 2017, Imamverdiyev et al., 2017, 2018, Keskin, 2003, 2005; Pearce et al., 1990].

Геохимические данные, в частности высокие значения для исследованных пород Th/Nb, Ba/Nb, K/Ti отношений, а также низкие величины Nb/Y и Ti/Y отношений, в сочетании с региональными геологическими данными, показывают, что мантийные источники под Малым Кавказом метасоматизированы более древними субдукционными процессами, в которых содержатся высококальциевые и обедненные HFSE водные флюиды. Габброидные нодулы и наименее дифференцированные базальтоиды миоцен-четвертичного возраста имеют аналогичные составы, указывающий об образовании их из обогащенного литосферного мантийного источника.

Субдукционное обогащение исходного расплава миоцен-четвертичного вулканизма региона хорошо отражается на диаграмме Th/Yb-Ta/Yb (рис. 1) [Pearce, 1982], которая отображает изменение отношения источника и влияние коровой контаминации. Как видно из рис. 1, миоцен-четвертичные лавы Малого Кавказа располагаются субпараллельно мантийной линии, но смещены по составам в сторону высоких Th/Yb отношений. Эти данные показывают, что литосферный мантийный источник обогащен субдукционным компонентом. Можно предполагать, что от верхнего миоцена до антропогена вследствие увеличения астеносферного эффекта доля субдукционного компонента уменьшалась.

На рис. 2 видно, что все точки составов пород раннего этапа и калиевые породы позднего этапа лежат в поле составов коллизийных магматических пород. Мафические же лавы повышенной щелочности позднего этапа находятся на границе между коллизийными и внутриплитными лавами. Эти данные показывают, что от миоцена до четвертичного времени доля субдукционного компонента уменьшается и увеличивается доля астеносферного мантийного компонента.

Итак, полученные петрогеохимические данные показывают, что позднемиоцен-четвертичные вулканы образовались при различной степени плавления субдукционно обогащенной субконтинентальной литосферной мантии. Роль надсубдукционного вещества уменьшается при эволюции вулканизма с течением времени из-за увеличения доли астеносферного компонента в интервале от верхнего миоцена до четвертичного времени.

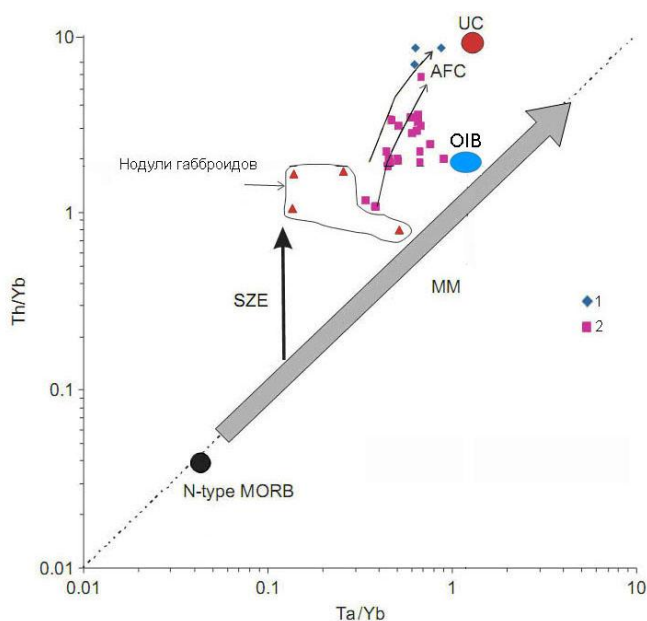


Рис.1. Th/Yb-Ta/Yb диаграмма (по [Pearce, 1982]) для неоген-четвертичных основных и средних пород Малого Кавказа. 1-ранний этап, 2-поздний этап, MM-тренд мантийного метасоматоза, SZE-обогащенная субдукционная зона, UC-верхняя кора.

Fig. 1. Th/Yb-Ta/Yb diagram (Pearce, 1982) for Neogene-Quaternary mafic and intermediate rocks of the Lesser Caucasus. 1 — early stage, 2 — late stage, MM — mantle metasomatism trend, ESZ — enriched subduction zone, UC — upper crust, OIB — oceanic-island basalts, AFC — assimilation-fractional crystallization, N-MORB — mid-ocean ridge basalts.

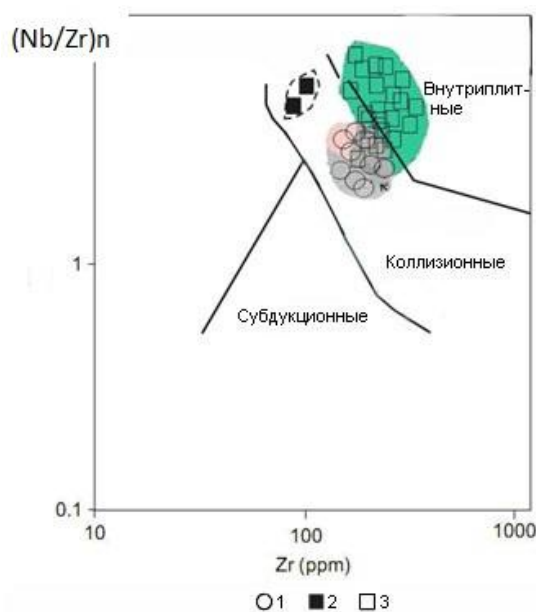


Рис.2. (Nb/Zr)_n-Zr диаграмма (по [Thieblemont, Tegyey, 1994]) для позднекайнозойских вулканических пород Малого Кавказа. Нормировано на N-MORB по [Pearce, 1982]. 1-ранний этап, 2, 3 поздний этап (черный квадрат - кислый, белый квадрат - мафический).

Fig. 2. N-MORB-normalized (Pearce, 1982) (Nb/Zr)_n-Zr diagram (Thieblemont and Tegyey, 1994) for Late Cenozoic volcanics of the Lesser Caucasus. 1 — early stage, 2, 3 — late stage.



Литература

- Имамвердиев Н.А., Велиев А.А., Гасангулиева М.Я.* Петрология и геохимия позднекайнозойского вулканизма Малого Кавказа. Баку, 2017. 320 с.
- Короновский Н.В., Демина Л.И.* Коллизионный этап развития Кавказского сектора Альпийского складчатого пояса: геодинамика и магматизм //Геотектоника. 1999. №2. С.17-35.
- Condie K.C.* Mantle plume and their record in Earth history: Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 306 p.
- Dilek Yildirim, Imamverdiyev Nazim, Altunkaynak Şafak* Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint //International Geology Review, 2010, volume 52, issue 4-6, p.536-578.
- Imamverdiyev N.A., Baba-zadeh V.M., Romanko A., et al.* Formation of the late cenozoic volcanic complexes of the Lesser Caucasus // Geotectonics, 2017. Vol. 51, No. 5, pp. 489–498. doi.org/10.1134/S0016852117050041
- Imamverdiyev N.A., Gasankuliyeva M.Y., Babayeva G.C., et al.* Petrogenesis of the Late Cenozoic volcanism of the central part of the Lesser Caucasus (Azerbaijan) // Russian Geology and Geophysics, Elsevier, 2018. No.1, p.41-54. DOI: [10.15372/GiG20180103](https://doi.org/10.15372/GiG20180103)
- Keskin M.* Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: an alternative model for collision related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey //Geophysical Research Letters, 2003. V.30. №24. P.9-1-9-4.
- Keskin M.* Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from Eastern Anatolia, //http: www.mantleplumes.org/Anatolia.html.2005.
- Pearce, J.A.* Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries, in Thorpe, R.S., ed., Andesites: New York, NY: Wiley, 1982, p. 525–548.
- Pearce J.A., Bender J.F., De Long, Kidd W.S.F. et al.* Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. J.Volcanol. Geotherm. Res., 1990, 44, p. 189-229.
- Thieblemont, D., Tegyeu, M.,* Une discrimination géochimique des roches différenciées témoin de la diversité d'origine et de la situation tectonique des magmas. Comptes Rendus del'Académie des Sciences, 1994. Paris, Vol. 319, No. II, pp. 87–94.

УДК 552.08+552.125

**ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ РАССЛОЕННЫЙ МАССИВ ЯРВА-ВАРАКА
(КОЛЬСКИЙ РЕГИОН) – ВОЗМОЖНАЯ АСТРОБЛЕМА**

Т.В. Каулина¹, Л.И. Нерович¹, В.И. Бочаров², В.В. Шиловских², В.Л. Ильченко¹

¹Геологический институт Кольского Научного центра РАН, Апатиты, Россия, kaulina@geoksc.apatity.ru

²Ресурсный центр Геомодель СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены признаки ударного метаморфизма в породах и минералах расслоенного массива Ярва-варака и его обрамления. Массив расположен в Мончегорском рудном районе Кольского региона. К признакам импактного генезиса массива относятся псевдотахилитовая брекчия, структуры смятия в биотите и клиноцоизите, планарные деформации в кварце, диаплектовые стекла циркона, силлиманита и плагиоклаза, деформационные микроструктуры в монаците. Совокупность имеющихся признаков позволяет предполагать импактное происхождение массива Ярва-варака около 2.5 млрд лет назад.

Ключевые слова: астроблемы, импактные структуры, ударный метаморфизм, докембрий, Мончегорский рудный район

**PALEOPROTEROZOIC LAYERED JARVA-VARAKA MASSIF (KOLA REGION) –
A PROBABLE ASTROBLEME**

T.V. Kaulina¹, L.I. Nerovich¹, V.I. Bocharov², V.V. Shilovskikh², V.L. Il'chenko¹

¹Geological Institute of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

²Resource center for Geo-Environmental Research and Modeling of St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Signs of shock metamorphism in rocks and minerals of the layered Jarva-varaka massif and the host rocks are described. The massif is located in the Monchegorsk ore district of the Kola region. Signs of the impact genesis of the massif include pseudotachylite breccia, “kink-banding” structures in biotite and clinozoisite, planar deformations in quartz, diaplectic glasses of zircon, sillimanite, and plagioclase, and deformation microstructures in monazite. The totality of available features allows us to assume the impact origin of the Jarva-Varaka massif *ca.* 2.5 Ga ago.

Key words: astroblems, impact structures, shock metamorphism, Precambrian, Monchegorsk ore district

Исследования возможных космогенных структур на Балтийском щите, которое проводилось в 1980-е годы сотрудниками ВСЕГЕИ, позволили выделить в Карело-Кольском регионе несколько потенциально алмазоносных предположительно импактных структур: Арваренч, Усть-Поной, Панаярви, Кумса и Гирвас, Мотко, Келярви (рис. 1). В настоящее время в Карелии известны две импактные структуры: Янисъярви возраста 725±5 млн лет [Вишневский и др., 2002] и Суавъярви возраста ~ 2400 млн лет [Mashchak, Naumov, 2012]. В Кольском регионе импактное происхождение предполагается для Яврозерской кольцевой структуры [Kaulina et al., 2020] и расслоенного массива Ярва-варака [Нерович и др., 2020] (рис. 1).

Расслоенный массив Ярва-варака расположен в Мончегорском рудном районе (рис. 1) и представляет собой интрузивное тело 1.7×2.2 км, мощностью до 2 км. Геолого-петрографическое и петрогеохимическое изучение пород массива [Нерович и др., 2020 и ссылки там] показало его сходство с массивом Садбери, для которого доказано импактное происхождение. Одним из основных критериев сходства являлось наличие гранофилов (микропегматита) по всему разрезу Ярва-вараки, что свидетельствует о существенной коровой контаминации, и среди большинства расслоенных интрузий мира подобный разрез наблюдается только в магматическом комплексе Садбери. В ходе дальнейшего изучения в породах обрамления массива Ярва-варака были обнаружены следующие признаки ударного метаморфизма: псевдотахилитовая брекчия с грис-структурой

(брекчия в брекчии); полосы смятия в биотите и клиноцоизите; планарные структуры в кварце [Нерович и др., 2020]; диаплектовые стекла циркона, плагиоклаза и силлиманита [Kaulina et al., 2020]; деформационные микроструктуры в монаците.

Образование брекчии в брекчии обычно связывают с неравномерно проявленным дроблением импактированных пород. При микрозондовом исследовании установлена криптокристаллическая структура цемента брекчии, которая характерна и для других псевдотахилитов мира. Полосы смятия и излома, структура “kink banding”, типична для минералов в гнейсах основания Садбери. При этом если полосы смятия в биотите могут быть связаны с деформацией, то полосы смятия в клиноцоизите являются признаком импакта [Tgermann and Spray, 2006]. Образование диаплектовых стекол циркона и плагиоклаза происходит при температуре 1300-1500 ° C и давлении выше 30 ГПа [Stöffler et al., 1986; Wittmann et al., 2006]. В монаците из гранитогнейсов обрамления массива Ярва-варака обнаружены деформационные микроструктуры с образованием двойников и новообразованных участков локальной перекристаллизации, которые описаны и в монаците из импактных структур Вредефорт и Яррабубба [Erickson et al., 2016 и ссылки там].

Не все полученные данные однозначно указывают на импактное происхождения массива Ярва-варака, многие из вышеприведенных структур характерны и для эндогенных процессов [French and Koeberl, 2010], тем не менее, совокупность имеющихся признаков позволяет с большой долей вероятности говорить об импактном происхождении массива Ярва-Варака. Датирование циркона и бадделеита из пижонит-авгитовых диоритов массива Ярва-варака (SHRIMP-II, ЦИИ ВСЕГЕИ) определило возраст кристаллизации пород в 2498±6 млн лет. Геохронологические данные вместе с признаками импактного происхождения массива позволяют говорить, что на сегодняшний день, массив Ярва-варака является древнейшей из известных астроблем на Балтийском щите.

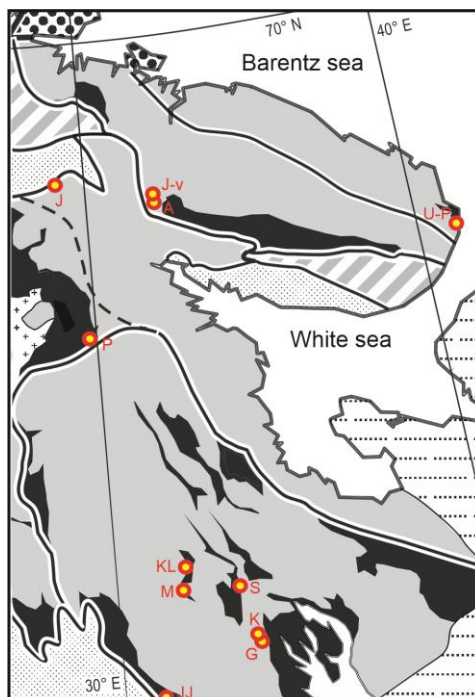


Рис. 1. Карта Карело-Кольского региона с местоположением предполагаемых астроблем (А – Арваренч, J-v – Ярва-варака, J – Яврозеро, JJ – Янисъярви, G – Гирвас, Kl – Келярви, K – Кумса, M – Мотко, P – Панаярви, S – Суавьярви, U-P – Усть-Поной).

Fig. 1. Map of the Karelian-Kola region with the location of the alleged astroblems (A - Arvarench, J-v - Jarva-varaka, J - Yavrozero, JJ - Janisjarvi, G - Girvas, Kl - Kelyarvi, K - Kumsa, M - Motko, P - Panayarvi, S - Suavyarvi, U-P - Ust-Ponoi).



Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания ГИ КНЦ РАН по теме НИР № АААА-А19-119100290148-4, FMEZ-2022-0025 с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель» научного парка СПбГУ.

Литература

- Вишневский С. А., Пальчик Н. А., Мороз Т. Н., Леонова И. В. Shock Ударно метаморфизованное углеродистое вещество в импактиках астроблемы Янисъярви, Карелия // ДАН. 2002. Т. 387. No 5. P. 674-677.
- Нерович Л. И., Ильченко В. Л., Каулина Т. В., Базай А. В., Кунаккузин Е. Л., Мудрук С. В., Борисенко Е. С., Сосновская М. А. Первая находка псевдотахилитовой брекчии и другие признаки ударного метаморфизма в породах обрамления массива Ярва-варака (Мончегорский рудный район) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. №17. С. 384-389. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.073>
- Erickson T. M., Cavosie A. J., Pearce M. A., Timms N. E., Reddy S. M. Empirical constraints on shock features in monazite using shocked zircon inclusions // *Geology*. 2016. 44 (8). P. 635–638.
- French B. M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth-Science Reviews*. 2010. V. 98. P. 123–170.
- Kaulina T. V., Nerovich L. I., Il'chenko V. L., Lialina L. M., Kunakkuzin E. L., Ganninbal M. A., Mudruk S. V., Elizarov D. V., Borisenko E. S. Astroblems in the early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic shield). In: *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth*. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore. 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3.
- Mashchak M. S., Naumov M. V. The Suavjärvi impact structure, NW Russia // *Meteoritics & Planetary Science*. 2012. V. 47, No 10. P. 1644–1658.
- Trepmann C. A., Spray J. G. Shock-induced crystal-plastic deformation and post-shock annealing of quartz: microstructural evidence from crystalline target rocks of the Charlevoix impact structure, Canada // *Eur. J. Mineral.* 2006. No 18. P. 161–173
- Stöffler D., Ostertag R., Jammes C., Pfannschmidt G. Shock metamorphism and petrology of the Shergotty achondrite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1986. Vol. 50. P. 889–903.
- Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R. T., Stöffler D. Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters // *Meteoritics & Planetary Science*. 2006. Vol. 41, No 3. P. 433–454.

УДК 551.24+551.71+550.4

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Н.Е.Козлов¹, Н.О.Сорохтин^{2,1}

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, kozlov.n.e@yandex.ru

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Описаны методы реконструкции условий формирования протолитов древнейших комплексов, позволяющие вводить поправку на химическую эволюцию вещества Земли и дающие возможность при геодинамических реконструкциях в докембрии более корректно оперировать понятием тенденций изменения режимов, не проводя полных аналогий с фанерозоем, а также методы поиска единого тренда эволюции состава для нескольких изначально заданных последовательностей объектов. Возможности этих методов проиллюстрированы на примере изучения архейских комплексов Кольского региона.

Ключевые слова: докембрий; методы геодинамических реконструкций, поиск трендов отличий.

POSSIBILITIES AND CONSTRAINS OF PETROGEOCHEMICAL METHODS IN THE STUDY OF HISTORY OF PRECAMBRIAN COMPLEXES EVOLUTION

N.E. Kozlov¹, N.O. Sorokhtin^{2,1}

¹Geological Institute of the Kola Scientific Center of the RAS, Apatity, Russia

²Institute of Oceanology P.P. Shirshov of the RAS, Moscow, Russia

Described below are methods for reconstruction of formation settings for protoliths of ancient complexes that enable adjustment for the chemical evolution of the Earth matter and make it possible to apply the concept of trends in regime changes for geodynamic reconstructions in the Precambrian more correctly, providing no complete analogues with the Phanerozoic. In addition, methods for a single trend in the compositional evolution are described for several given sequences of objects. Possibilities of these methods are demonstrated on the example of the study of Archaean complexes in the Kola region.

Key words: Precambrian, methods for geodynamic reconstructions, search for difference trends.

Геология докембрия имеет свои особые черты, связанные со специфичностью этого периода, поэтому ее изучение требует привлечения не только традиционных, апробированных на фанерозойских объектах методов, но и иных подходов, иногда различных даже при исследовании отдельных периодов длительной докембрийской истории. Авторы настоящей работы занимаются данной проблемой достаточно давно [Козлов, 1995; Козлов и др., 1999, 2014, 2017; Kozlov et al., 2018; Sorokhtin et al., 2020 и др.]. Наиболее важная особенность нашего подхода к ее решению - все методы расчетов, построения и т.д. основаны на математических законах и строгих методах обработки данных. Это позволяет, по крайней мере, на исходной стадии, до интерпретации результатов, работать с объективной информацией.

Кроме того, сопоставление вещественного состава пород проводится нами в многомерном пространстве, где границы, разделяющие поля фигуративных точек пород, достаточно устойчивы. Сравнение объектов таким способом является более корректным, позволяя дать математически обоснованный ответ на вопрос, к какому из эталонов наиболее близок наш исследуемый объект, не будучи, строго говоря, идентичным ни одному из них. И, наконец, нами разработан метод поиска единого тренда для нескольких изначально заданных последовательностей объектов [Козлов и др., 2014; Sorokhtin et al., 2020], что позволяет определять на нем место любого иного объекта, ранее не использованного в качестве основы для его поиска.

Следует напомнить, что между составом базальтов фанерозоя и metabазальтов докембрия нами были установлены устойчивые системные отличия [Козлов и др., 1999]. Таким образом, процессы химической эволюции вещества в ходе геологического времени накладывают ограничения на использование принципа актуализма при изучении раннедокембрийских комплексов. Поэтому при проведении параллелей между докембрийскими и фанерозойскими породными комплексами необходимо исходить из предположения о специфичности докембрийского периода развития планеты, с одной стороны, и некоторой общности в характере реализации геодинамических обстановок на всем протяжении геологической истории, с другой. Данный подход был сформулирован ранее [Козлов, 1995] как положение о гомологичных рядах геодинамических режимов, что реализуется при изучении раннедокембрийских комплексов древнейших щитов.

По нашему мнению, для получения достоверных результатов при сопоставлении состава древнейших породных ассоциаций и фанерозойских гомологов необходим учет отличий состава докембрийских образований относительно фанерозойских эталонов (т.е., в данном случае, «смещения» состава докембрийских metabазальтов в многомерном пространстве относительно базальтов фанерозоя) и только после этого поиск эталона, максимально сходного с исследуемым объектом. В этой связи значительный интерес при решении задач реконструкции представляют теоретические данные, количественно описывающие эволюционные процессы. Методика учета информации о возможной петрогеохимической эволюции мантии, значимо повышающая достоверность реконструкций, описана ранее [Козлов и др., 2017].

В то же время использование этой информации о петрогеохимической эволюции мантии носит, в определенной мере, субъективный характер, поскольку характеристики исследуемого объекта вычисляются по формуле: $X^* = \{x_i + \beta \cdot v\}$ ($i=1, \dots, n$), где v – вектор «смещения» химического состава мантии во времени, а β – некоторый коэффициент, который вычисляется в интерактивном режиме, характеризуя отличия по химизму состава мантии от пород основного состава в выбранный момент времени и изменяясь в зависимости от этого.

С учетом изложенного, для реконструкции раннедокембрийских геодинамических режимов был разработан дополнительный метод, более эффективный в сравнении с использованными авторами ранее [Kozlov et al., 2018; Sorokhtin et al., 2020]. Смещение объектов докембрия относительно эталонов фанерозоя в признаковом пространстве (объекты докембрия и эталоны фанерозоя, представленные множествами фигуративных точек) предлагается описывать при помощи поверхности второго порядка, разделяющей совокупности объектов докембрия и фанерозоя. При этом критерием того, что эта поверхность является разделяющей, служит статистическая значимость отличия между множествами фигуративных точек каждого объекта с множествами проекций этих точек на вышеуказанную поверхность, при том, что множества фигуративных точек объектов докембрия и фанерозоя расположены по разные стороны этой поверхности. Используется оптимальная разделяющая поверхность, для которой минимальная близость всей совокупности объектов к поверхности – максимальна.

Тем не менее, и этот метод не всегда позволяет давать однозначный ответ об отнесении геодинамической обстановки формирования протолитов некоторых из исследованных докембрийских комплексов к какому-либо одному конкретному типу. В связи с этим наиболее корректным мы полагаем описание тех или иных тенденций эволюции этих обстановок.

Еще одной проблемой, которая часто стоит перед исследователями раннедокембрийских комплексов, является поиск линейного упорядочения геологических объектов (например, по времени формирования протолитов слагающих их пород) на основе заданного отношения частичного порядка. Чтобы перейти от частичного порядка к линейному, был предложен следующий метод: находится линейный тренд F из условия наилучшего (статистически значимого относительно рангового критерия Пури-Сена-Тамуры) разделения совокупностей проекций химических составов пород изучаемых структур (многомерных величин) на этот тренд [Sorokhtin et al., 2020].

Этот метод был использован при решении задачи поиска возможного тренда изменения состава архейских пород от более молодых к более древним для структур Кольского полуострова [Kozlov et al., 2018]. В сочетании с методом реконструкции геодинамических режимов формирования протолитов исследованных комплексов пород при помощи поверхности второго порядка, разделяющей объекты докембрия и фанерозоя, эти исследования позволили установить тенденцию смены режимов, по петрогеохимическим характеристикам наиболее сходных с траппами, режимами, более близкими континентальным рифтам, и, затем, к островодужным [Kozlov et al., 2018]. Данная ситуация не является исключением. Так, подобная смена плюмового магматизма субдукционным в пределах одного региона ограниченной площади, описана, к примеру, для более молодых комплексов центральной и восточной Арктики [Добрецов и др., 2013].

Другим примером результативности использования наших методик может служить изучение Кейвского террейна. Проведенные в пределах Кейвского микроконтинента исследования показали, что в неоархее он был погружен на некоторую глубину надвинувшимися на него соседними континентальными доменами коры Кольского региона [Sorokhtin et al., 2020]. В результате этого Кейвский микроконтинент можно считать одним из древнейших срединных массивов докембрийской континентальной коры.

Была предпринята попытка поиска особенностей состава супракрустальных комплексов различных частей Кейвского домена, подтверждающих или опровергающих на вещественном уровне описанные выше геодинамические построения. В основу этих исследований было положено предположение, что в рамках предложенной модели формирования породных комплексов Кейвской структуры различные ее области должны были бы в разной степени походить по составу на вещество окружающих ее доменов. Так, ее северная часть должна была бы иметь более существенное сходство с породами Мурманского домена, чем южная. Южная же, наоборот, должна была бы иметь черты большего сходства с породными ассоциациями Терского домена и Беломорского подвижного пояса, чем северная ее часть. Аналогичным образом должно было бы проявиться, соответственно, сходство пород западной и восточной частей Кейвского и Кольско-Норвежского доменов. Итоги сопоставления полученных в результате математического моделирования данных подтверждают предложенную выше геолого-геофизическую модель развития Кейвской структуры в раннем докембрии [Sorokhtin et al., 2020].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Эволюция состава метавулканитов в ходе геологического времени накладывает ограничения на применение принципа актуализма для различного рода реконструкций при исследовании древнейших комплексов. С учетом этого более корректным при реконструкции геодинамических обстановок раннего докембрия представляется использование не данных о близости к тому или иному режиму фанерозоя, а тенденций изменения величины сходства-различия с теми или иными из них.

- С использованием предложенных нами методик установлено, что при формировании древнейших породных ассоциаций Кольского региона происходила смена геодинамических режимов, наиболее сходных с траппами, обстановками, более близкими к континентальным рифтогенным и, далее, островодужным. Данные о составе пород Кейвского домена в сравнении с породами его обрамления подтверждают его формирование как древнейшего срединного массива. Установлено, что процессы формирования Кольского орогена имели выраженную пространственно-временную зональность и импульсный характер.

Таким образом, при всех имеющихся ограничениях петрогеохимические методы дают хорошие результаты при изучении истории развития докембрийских комплексов.

Благодарности и источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке тем НИР ГИ КНЦ РАН и ИО РАН (№№ FMEZ-2022-0025, FMWE-2021-0004). Авторы отдают дань памяти своему постоянному соавтору Е.В.Мартынову, отвечавшему за математическое обеспечение изложенных выше методов.



Литература

Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В., Кораго Е.А., Симонов В.А. Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции центральной и восточной Арктики// Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 8, с. 1126—1144

Козлов Н.Е. Вещественный состав метаморфических комплексов высокобарных гранулитовых поясов и проблема формирования их протолитов (на примере Лапландских гранулитов). Автореферат докторск. дисс., С-Пб., ИГГД, 1995, 36с

Козлов Н.Е., Мартынов Е.В., Иванов А.А. Черты петрогеохимических различий основных пород энсиалических и энсиматических комплексов (сравнительный анализ фанерозоя и докембрия), Геохимия, №6, 1999, с.582-588.

Козлов Н.Е., Мартынов Е.В., Сорохтин Н.О., Марчук Т.С. Эволюция вещественного состава метабазитов раннего докембрия Кольского региона. Вестник МГТУ, т.17, №2, 2014 с. 304-313

Козлов Н.Е. Мартынов Е.В. Сорохтин Н.О. Марчук Т.С. Петрогеохимические методы реконструкции геодинамических обстановок формирования раннедокембрийских комплексов и их ограничения Геодинамика раннего докембрия: сходство и различия с фанерозоем. Материалы научной конференции и путеводитель экмкурсий. Петрозаводск, Кар. НЦ РАН, 2017 С.117-120

Sorokhtin N.O., Kozlov N.E., Glaznev V.N., Martynov E.V. A Study in Earth's Geological Evolution (The Baltic Shield). Wiley. 2020. 588 p.

Kozlov N.E., Sorokhtin N.O., Martynov E.V. Geodynamic Evolution and Metallogeny of Archaean Structural and Compositional Complexes in the North-western Russian Arctic // Minerals. 2018. 8(12). 573. DOI: 10.3390/min8120573



УДК 551.251:551.24

**СЕВЕРО-ЕНИСЕЙСКИЙ ОРОГЕН (ЗАПАДНАЯ ОКРАИНА СИБИРСКОГО КРАТОНА):
ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ТЕКТОНО-МЕТАМОРФИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ
ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

П.С. Козлов

Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия, geoco2012@yandex.ru

Впервые в докембрийском складчатом обрамлении на западе Сибирского кратона выделен Северо-Енисейский ороген. На основании комплекса методов, полицикличности и эволюции тектоно-метаморфических и магматических комплексов установлены основные этапы его формирования, на рубежах (млрд лет): (1) гренвилльский (1.18-0.85), (2) этап деструкции гренвиллид (на западе, 1.18-0.80) и (3) байкальский (вальгальский) орогенез (на востоке, 0.80-0.60).

Ключевые слова: Северо-Енисейский ороген, докембрий, тектоно-метаморфические комплексы.

**NORTH YENISEI OROGEN (WEST SIBERIAN CRATON): STAGES OF FORMATION AND
TECTONO-METAMORPHIC EVOLUTION**

P.S. Kozlov

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

For the first time, the North Yenisei orogen was isolated in the Precambrian folded frame in the west of the Siberian craton. Based on a set of methods, polycyclicality and evolution of tectonic-metamorphic and magmatic complexes, the main stages of its formation have been established, at the boundaries (billion years): (1) Grenville (1.18-0.85), (2) the stage of destruction of Grenvillids (in the west, 1.18-0.80) and (3) Baikal (Valgalian) orogeny (in the east, 0.80-0.60).

Keywords: North Yenisei orogen, Precambrian, tectonic-metamorphic complexes

Ключевой проблемой для периода 1.2-0.6 млрд лет назад на западе Сибирского кратона (СК) являются слабо исследованные вопросы реконструкции и фиксирования возрастных рубежей гренвилльской и байкальской орогенических эпох, связанные с

глобальными тектоническими событиями. Расхождение взглядов на тектоническую природу Северо-Енисейского кряжа (СЕК) [например, Верниковский, Верниковская, 2006; Лиханов и др., 2014; Kuz'michev, Sklyarov, 2016 и др.] связано с недоисследованностью петрологических индикаторов геодинамических обстановок и изотопного датирования докембрийских магматических и тектоно-метаморфических комплексов (ТМК). Новые данные по составу и эволюции магматических и метаморфических комплексов региона позволяют предложить новую модель.

В строении континентальной коры региона выделены палеоконтинентальный (ПКС) и палеоокеанический (ПОС) сектора. Согласно рифтогенно-коллизивной модели эволюции докембрийских комплексов, в формировании Северо-Енисейского орогена (СЕО) на западе СК выделяется три этапа: (1) гренвилльский (1.18-0.85 млрд лет), (2) деструкции гренвиллид (на западе, 1.18-0.80 млрд лет), (3) байкальский (вальгальский, [Лиханов и др., 2015]) (0.80-0.60 млрд лет).

(1) Гренвилльский этап (1.18-0.85 млрд лет) коррелируется с временем формирования гипотетического суперконтинента Родиния [Богданова, Писаревский, Ли, 2009]. Петрологическими и геодинамическими индикаторами становления СЕО на гренвилльском являются полиметаморфические комплексы ПКС (Гаревский, Тейский, Приангарский). Регионально-метаморфизованные породы Анд-Сил типа, Тейский и Гаревский гранитогнейсовые купола (ГТК) с возрастными ~ 1.1 и ~ 0.85 млрд лет [Ножкин и др., 1999]. и неопротерозойские

гранитоиды (Тейский, Аяхтинский, Татарский и др. комплексы) обнажены в Центральном, Приенисейском и Кулаковском поднятиях (антиклинориях). Становление комплексов сопровождалось региональным LP/HT метаморфизмом (1.18-0.90 млрд лет) осадочных палеопротерозой-мезопротерозойских толщ [Лиханов и др., 2014 и ссылки в ней]. Постгренильский Ки-Сил MP/LT коллизионный (дислокационный) метаморфизм проявился в Ишимбинско-Татарской сдвиговой зоне надвигами западной (0.85 млрд лет) и восточной (0.80 млрд лет) вергентности. Тейский и Гаревский ТМК были сформированы в процессе утолщения земной коры. Они отличаются структурно-геологической позицией, геотермическими градиентами, P-T условиями, режимами давлений, имеют близкие возраста проградного полиметаморфизма. Итоговые P-T-t тренды метаморфизма приведены в [Лиханов, 2020].

(2) Этап деструкции гренильид (на западе, 1.18-0.800 млрд лет) – этап распада Родинии и ранней стадии образования Палео-Азиатского океана (ПАО) [Богданова, Писаревский, Ли, 2009] на рубеже около 1 млрд лет назад [Kuz'michev, Sklyarov, 2016; Ножкин и др., 2021] и его закрытия в эдиакарии. Индикаторы геодинамической обстановки растяжения коры, возможно связанные с распадом Родинии [Козлов и др., 2020], зафиксированы в Приенисейской сдвиговой зоне ПКС пределах Гаревского метакомплекса: рапакивитоподобные метаграниты (0.87 млрд лет, U-Pb, циркон), бимодальный дайковый пояс (0.80 млрд лет, U-Pb, циркон) [Лиханов и др., 2014], рифтогенная метапикрит-базальтовая ассоциация в основании Ангаро-Большепитского палеобассейна на рубеже мезо-неопротерозоя [Ножкин и др., 2021], свидетельствующие о наложении деформаций и сопутствующего магматизма на поздние гренильиды.

Раскрытие ПАО обосновано наличием неопротерозойских метафиолитов [Верниковский, Верниковская, 2006 и ссылки в ней; Kuz'michev, Sklyarov, 2016], и ссылки в ней] островодужных комплексов, позволяющих реконструировать субдукцию восточной вергентности, а также реликтов метаморфизма глаукофановой фации [Лиханов и др., 2019].

(3) Байкальский (вальгальский, пики 0.81-0.79 и 0.73—0.71 млрд лет) орогенез (0.80-0.60 млрд лет) в западной части сопровождается коллизией Касско-Туруханского микроконтинента с СК [Козлов и др., 2020]. Об этом свидетельствует 0.62 млн лет (40Ar-39Ar метод по амфиболу), высокobarический (HP/HT) метаморфизм (бластомилониты по базитам) и 0.63-0.64 млн лет HP/LT с реликтами глаукофана [Лиханов и др., 2021]. Субдукция завершается расщеплением океанических комплексов и частичной обдукцией их на СК, образованием орогена окраинно-континентального типа и латеральным наращиванием континентальной коры Сибирского кратона (0.64-0.60 млрд лет) [Лиханов и др., 2014 и ссылки в ней; Козлов и др., 2020; Ножкин и др., 2021]. Столкновение океанического блока с СК 0.63-0.60 млрд лет (40Ar-39Ar, слюды, амфибол) контролируется зонами фронтальных MP/LT и MP/HT бластомилонитов – метаморфическими индикаторами зон сжатия и деформаций сдвига СЗ простирания [Лиханов и др., 2021].

В этот период в Восточном блоке СЕК происходило формирование рифтогенных прогибов и грабенов (Уволжский, Чапский и др.) Ангаро-Тисского и Ангаро-Питского синклиналиев, низкотемпературный метаморфизм погружения осадочных толщ тунгусикской и осянковой серий и локальных зон бластомилонитов. Становление Северо-Енисейского орогена завершается около 600 млн лет назад, далее следует платформенный этап развития.

Период геологического развития СЕК в интервале 1.2-0.6 млрд лет назад на

западной окраине СК завершается ростом континентальной литосферы и 3-х этапным образованием Северо-Енисейского орогена окраинно-континентального типа на неоархей?- палеопротерозойской коре СК. Полученные результаты, по сравнению с другими тектоническими моделями [например, Верниковский, Верниковская, 2006; Kuz'michev, Sklyarov, 2016], свидетельствуют о высокой эндогенной активности западной периферии СК в позднем докембрии [Ножкин, 1999; Лиханов и др., 2014 и др.] и дают новое представление о геологических процессах, сформировавших докембрийскую покровно-складчатую структуру Северо-Енисейского кряжа.



Благодарности и источник финансирования: Работа выполнена за счет средств ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, АААА-А18-118052590032-6) и Российского научного фонда, проект № 21-77-20018.

Литература

Богданова С. В., Писаревский С. А., Ли Ч. Х. Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2009. Т. 17. № 3. С. 29–45.

Верниковский В. А., Верниковская А. Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. №1. С. 35–52.

Козлов П. С., Филиппов Ю. Ф., Лиханов И. И., Ножкин А. Д. Геодинамическая модель эволюции Приенисейской палеосубдукционной зоны в неопротерозое (западная окраина Сибирского кратона), Россия // Геотектоника. 2020. Т. 54. № 1. С. 62–78. doi: 10.1134/S0016853X20010063.

Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Зиновьев С. В., Хиллер В. В. Свидетельства вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462, № 1. С. 73–78. doi: 10.15372/GiG20150601

Лиханов И. И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 4–22. doi: 10.31857/S0869590320010045.

Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Козлов П. С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. №1. С. 41– 65. doi: 10.31857/S0016853X21010070.

Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48. № 5. С. 32–53. doi: 10.7868/S0016853X1405004X

Ножкин А. Д. Раннепротерозойские окраинно-континентальные комплексы Ангарского складчатого пояса и особенности их металлогении // Геология и геофизика. – 1999. Т. 40. №11. С. 1524–1544.

Ножкин А. Д., Козлов П. С., Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Крылов А. А. Раннепротерозойская метапикрит-базальтовая ассоциация приангарской части Енисейского кряжа: петрогеохимический состав, обстановки образования и Pb-Zn рудоносность // Геохимия. 2021. Т. 66. №5. С. 387–406. doi: 10.31857/S001675252105006X.

Kuz'michev A. B., Sklyarov E. V. The Precambrian of Transangaria, Yenisey Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville–age orogeny, or reworked margin of the Siberian craton // J. Asian Earth Sci. 2016. V. 115. P. 419– 441.

УДК 552.1, 552.16

**АРХЕЙСКИЕ ЧАРНОКИТ-ЭНДЕРБИТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ БЕЛОМОРЬЯ.
ПРОИСХОЖДЕНИЕ И УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ РАСПЛАВОВ**

В.М. Козловский¹, В.В. Травин², Т.Ф. Зингер³, Е.Б. Курдюков¹, М.А. Якушик¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, bazily.koz@gmail.com

²Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

³Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

Для наиболее хорошо сохранившегося в Беломорье массива архейских эндербитов и чарнокитов Поньгома-Наволоку установлен протолит и получены условия генерации эндербитового расплава. Выплавление эндербитов главной фазы проходило при $P=12,8-15,8$ кбар и $T=1030-1080^\circ\text{C}$ в результате воздействия на амфиболиты мантийного водно-углекислотно-солевого флюида. Архейский гранулитовый метаморфизм в породах Беломорского подвижного пояса обусловлен тепловым потоком, генерированным массивами чарнокитоидов и имеет контактовую природу.

Ключевые слова: гранулиты, чарнокиты, эндербиты, метаморфический флюид, моделирование условий метаморфизма, Беломорский подвижный пояс.

**ARCHEAN CHARNOCKITE-ENDERBITE COMPLEX IN BELOMORIE: ORIGIN AND MELT
GENERATION PARAMETERS**

V.M. Kozlovsky¹, V.V. Travin², T.F. Zinger³, E.B. Kurdyukov¹, and M.A. Yakushik¹

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia

²Institute of Geology, Karelian Scientific Center of the RAS, Petrozavodsk, Russia

³Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS St. Petersburg, Russia

The protolith is reproduced and the parameters of enderbite melt generation are calculated for of the Pon'goma Navolok charnockite-enderbite massif (the best preserved massif of the type in Belomorie). The enderbite melt was derived at $P = 12.8-15.8$ kbar and $T = 1030-1080^\circ\text{C}$ from an amphibolite protolith under the effect of saline $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ mantle fluid. The Archean granulite-facies metamorphism of the rocks of the Belomorian Mobile Belt was controlled by heat flux from the charnockite massifs and was thus of contact nature.

Keywords: granulites, charnockites, enderbites, metamorphic fluid, simulation of metamorphic parameters, Belomorian Mobile Belt

Большинство первичных особенностей архейских магматических комплексов Беломорского подвижного пояса северной Карелии (БПП) плохо сохранились из-за наложенного палеопротерозойского метаморфизма. Однако, массив эндербитов и чарнокитов Поньгома-Наволоку, изучавшийся ранее Л.А.Косым, Н.Г.Судовиковым, К.А.Шуркиным, Г.М.Друговой, Н.Е.Король и др. представляет собой жесткий блок, сохранившийся между отдельными зонами деформаций, что позволило оценить условия его формирования. Массив имеет двухфазное строение. Главная ранняя фаза внедрения - дупироксеновые эндербиты 2728±21 млн лет, поздняя дайковая фаза - пегматоидные или среднезеннитые отропироксеновые чарнокиты, предположительно 2718 млн лет (по данным Левченкова с соавторами, 1996).

В теле массива расположены крупные (протяженностью до 800 м и мощностью 30-50 м) пластины (останцы) амфиболитов. Для останцов установлен проградный тренд метаморфических преобразований от амфиболитовой до гранулитовой фации (рис. 1Б), а в окружающем метаморфическом обрамлении массива

следов гранулитового метаморфизма не выявлено. В останцах амфиболитов не выявлено также признаков гранулитовой мигматизации; нет их и в метаморфическом обрамлении. Это является признаком того, что в современном эрозионном срезе представлена часть интрузивного массива, перемещенного из мест выплавки на более высокие горизонты коры.

Опираясь на многочисленные парные логарифмические соотношения петрогенных и малых элементов в амфиболитах из останцов внутри массива и в эндебритах можно сказать, что амфиболиты останцов, или аналогичные им по химическому составу более глубокие породы, являлись протолитом для выплавки эндебритов.

Моделирование плавления амфиболитов и кристаллизации эндебритов проводилось методом псевдосекций с использованием программного комплекса PERPLE_X 6.8.7. В модели плавления (рис. 1 А) соотношение петрогенных компонентов взято из анализа амфиболита из крупного останца внутри массива. Положение поля устойчивости эндебритового расплава определялось с помощью изоплет молекулярных соотношений $Al_2O_3/(Al_2O_3+FeO+MgO+CaO)$, $(FeO+MgO)/(Al_2O_3+FeO+MgO+CaO)$, $CaO/(Al_2O_3+FeO+MgO+CaO)$. В модели кристаллизации (рис. 1Б) соотношение петрогенных компонентов взято из анализа наиболее характерного эндебрита. Область кристаллизации оконтурена по изоплетам молекулярных соотношений $FeO/(FeO+MgO)$ и $Al_2O_3/(Al_2O_3+FeO+MgO)$ в ортопироксене и мольной доли An в плагиоклазе.

В результате моделирования была определена область, в которой при плавлении амфиболитов под действием $NaCl-CO_2-H_2O$ флюида наиболее вероятно могло происходить зарождение расплавов, близких по составу к эндебритам массива Поньгома-Наволока – $P=12,8-15,8$ кбар и $T=1030-1080^\circ C$ (среднее значение $P=14,8$ кбар и $T=1060^\circ C$ для 7 анализов эндебритов) (рис. 1А). Для разных соотношений $NaCl:CO_2:H_2O$ во флюиде положение области плавления в P-T поле отличалось незначительно. Полученные весьма высокие параметры P и T указывают на то, что выплавление архейских эндебритов происходило на уровне границы кора-мантия.

Прямоугольниками на рис. 1Б, оконтуренными пунктирной линией, обозначены поля устойчивости минеральных ассоциаций в останце амфиболитов (рассчитаны методом TWQ): I-амфиболиты протолита, II-межзерновые новообразования Srx и Orx , III-мелкозернистые прожилки $Srx+Orx+Pl$, IV-массивные $Srx+Orx+Pl$ гранулиты, V-гигантозернистые $Srx+Orx+Pl$ гранулитовые жилы. Пик гранулитового метаморфизма в останцах амфиболитов проходил при существенно более низкой температуре и давлении $P=10,2-11,0$ кбара, $T=805-910^\circ C$, чем условия выплавки эндебритов (рис. 1А). Это различие совершенно необъяснимо с точки зрения регионального метаморфизма, при котором зарождение эндебритовых и чарнокитовых расплавов происходит в одном P-T-поле с гранулитами вмещающей рамы. Однако, такая ситуация типична для роговиков – пород контактового метаморфизма, которые сформировались под воздействием более горячего интрузивного массива, зародившегося на большей глубине, чем окружающее его обрамление.

Приуроченность многих проявлений основных гранулитов Беломорья к массивам эндебритов и чарнокитов (Поньгома-Наволока, Вичаны, Тупая Губа и др.) свидетельствуют в пользу того, что архейский гранулитовый метаморфизм в породах Беломорского подвижного пояса обусловлен тепловым воздействием интрузивных массивов, то есть имеет контактово-метаморфическую природу.

Благодарности и источник финансирования: Работы выполнены в рамках базовых тем НИР ИГЕМ РАН, ИГ Кар НЦ РАН, ИГГД РАН; анализы минералов для термобарометрических расчетов – в ЦКП “Аналитика” ИГЕМ РАН; ICP MS анализы пород – в ИГ КарНЦ.

УДК 552:550.4

**ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ДИОРИТ-ГРАНОДИОРИТОВЫЙ
МАГМАТИЗМ КУРСКОГО БЛОКА САРМАТИИ:
РАСШИФРОВКА СБЛИЖЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ**
**Е.Х. Кориш¹, К.А. Савко¹, Е.Б. Сальникова², А.В. Самсонов³, А.А. Иванова², А.Н. Ларионов⁴,
С.В. Цыбуляев¹**

¹*Воронежский университет, Воронеж, Россия, korish_k@rambler.ru*

²*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*

³*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия*

⁴*Центр изотопных исследований Всероссийского геологического института им. Д.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия*

В Курском блоке Сарматии в период 2,1-2,04 млрд лет происходила активная перестройка континентальной литосферы: (1) субдукция с отрывом слэба (2,14-2,10 млрд лет), (2) коллизия вулканическая дуга – континент ($\approx 2,09$ млрд лет), (3) постколлизийное растяжение и надсубдукционный магматизм (2,08-2,07 млрд лет), (4) коллизия континент – континент ($\approx 2,07$ млрд лет), (5) постколлизийный магматизм (2,07-2,04 млрд лет). Значения возраста от 2,08 до 2,05 млрд лет, полученные методом SIMS по циркону для гранодиоритового магматизма, указывали на обстановку постколлизийного растяжения. Датирование циркона и титанита методом TIMS показало, что их внедрение было 2,08-2,07 млрд лет назад до коллизии Сарматии и Волгоуралии в надсубдукционной обстановке.

Ключевые слова: Сарматия, Курский блок, палеопротерозой; магматизм.

**PALEOPROTEROZOIC DIORITE-GRANODIORITE MAGMATISM OF THE KURSK BLOCK OF
SARMATIA: DECIPHERING GEOLOGICAL EVENTS CLOSE IN TIME**

**E.Kh. Korish¹, K.A. Savko¹, E.B. Sal'nikova², A.V. Samsonov³, A.A. Ivanova², A.N. Larionov⁴,
S.V. Tsybulyaev¹**

¹*Voronezh State University, Universitetskaya sq, Voronezh, Russia*

²*Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia*

³*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia*

⁴*Centre for Isotope Research, Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia*

In the Kursk block of Sarmatia, in the interval of 2.1-2.04 Ga, an active reworking of the continental lithosphere took place: (1) subduction with the slab break-off (2.14-2.10 Ga), (2) collision of the volcanic arc - the continent (≈ 2.09 Ga), (3) postcollision extension and suprasubduction magmatism (2.08-2.07 Ga), (4) continent–continent collision (≈ 2.07 Ga), (5) post-collision magmatism (2.07-2.04 Ga). The SIMS zircon age values from 2.08 to 2.05 Ga for granodiorite magmatism indicated a postcollision extension. The zircon and titanite TIMS dating showed that their intrusion occurred at 2.08-2.07 Ga before the collision of Sarmatia and Volgouralia in a suprasubduction setting.

Key words: Sarmatia, Kursk block, Paleoproterozoic; magmatism

В палеопротерозойской истории Курского блока был протяженный по времени платформенный этап, когда на архейской платформе в период 2,5-2,4 млрд лет накапливались осадочные формации в условиях пассивной континентальной окраины. На рубеже 2,14-2,10 млрд лет доминировали субдукционные процессы погружения океанической плиты Волго-Донского орогена под континентальную кору Курского блока. С ними связан базальтовый магматизм с возрастом 2,1 млрд лет, вызванный подъемом астеносферных расплавов в зоне деструкции субдуцированной океанической плиты (slab-window) [Цыбуляев и др., 2021]. Причиной отрыва

слэба стало аккреционно-коллизийное взаимодействие типа вулканическая дуга - континент на окраине Курского блока и Волго-Донского орогена на рубеже около 2,1 млрд лет. После 2,1 млрд лет имел место короткий постколлизийный период релаксации $\approx 2,08-2,07$ млрд лет. Около 2,07 млрд лет в результате масштабной коллизии континент-континент Волгоуралии и Сарматии в обстановке сжатия породы осадочные толщи и базальты подверглись складчатости и метаморфизму [Savko et al., 2018]. Распад коллизийного орогена в период 2,07-2,04 млрд лет сопровождался плавлением нижней коры при внедрении базитовых магм в обстановке постколлизийного коллапса и деламинации литосферы [Савко и др., 2014] Таким образом, в относительно короткий интервал времени 2,1-2,04 млрд лет происходила активная перестройка континентальной литосферы со сменой геотектонических режимов.

Изотопное датирование магматических событий этого периода выполнялось по циркону на ионном зонде SHRIMP II, точность которого обычно $\pm 10-15$ млн лет. Поэтому значения возраста от 2,08 до 2,05 млрд лет не могут быть четким признаком геодинамической обстановки. В результате все проявления магматизма такого возраста интерпретировались как постколлизийные, хотя иногда таким выводам противоречили геохимические данные. Таким примером является диорит-гранодиоритовый магматизм Курского блока. Интрузии гранитоидов образуют массивы и штокообразные тела площадью от 2,5 до 57 км² и многочисленные дайки. Методом SIMS были установлены возрасты формирования массивов [Кориш и др., 2020; Савко и др., 2014, 2021]: Роговский - 2045 \pm 15 млн лет, Екатерининский 2049 \pm 7 млн лет, Щигровский 2047 \pm 10 млн лет, Северо-Щигровский - 2059 \pm 10 млн лет, Луневский - 2038 \pm 7 млн лет, Троснянский 2060 \pm 8 млн лет, Прилепский 2077 \pm 8 млн лет для гранодиоритов и 2066 \pm 12 млн лет для монцонитов. Так как почти все значения возраста моложе 2,07 млн лет, считалось, что диорит-гранодиоритовый магматизм имел постколлизийную природу.

Гранодиориты I-типа по геохимии близки к магмам вулканических дуг, а несколько интрузий имеют адакитовые геохимические характеристики, которые не согласуются с обстановкой постколлизийного растяжения и андерплейтинга. Для решения этой проблемы и более точной возрастной привязки выполнено датирование циркона и титанита из Северо-Щигровской и Прилепской интрузий методом TIMS. Для монцонитов Прилепской интрузии возраст циркона оказался 2081,2 \pm 3,2 млн лет (СКВО=1,18), сфена 2086 \pm 12 млн лет (СКВО=0,70). Циркон из гранодиоритов Северо-Щигровского массива, датированный методом TIMS, имеет возраст 2076,1 \pm 2,4 млн лет (СКВО=0,64). Таким образом, возраст гранодиоритов оказался древнее коллизийного события 2070 млн лет, что полностью меняет представление о геотектонической позиции диорит-гранодиоритового магматизма.

Оценка возраста формирования Северо-Щигровского и Прилепского массивов 2,07-2,08 млрд лет предполагает, что их внедрение произошло до коллизии Сарматии и Волгоуралии. После субдукции с отрывом слэба ($\approx 2,14-2,10$ млрд лет) и коллизией континент – вулканическая дуга ($\approx 2,10-2,09$ млрд лет) был короткий период релаксации и растяжения ($\approx 2,08-2,07$ млрд лет), когда имел место диорит-гранодиоритовый магматизм. Источником могли быть протолиты из субконтинентальной литосферной мантии при плавлении субдуцированного океанического слэба около 2,1 млрд лет. Существенный вклад архейского корового субстрата (палео- и мезоархейские ГТГ) в петрогенезис диорит-гранодиоритовых магм также не вызывает сомнений. Их внедрение в интервале 2,08-2,07 млрд лет является продуктом магматизма в надсубдукционной обстановке.

Литература

Savko K.A., Samsonov A.V., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Korish E.H., Larionov A.N., Anisimova I.V., Bazikov N.S. The early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia // Precambrian Research. 2018. V. 311. P. 1–23. doi.org/10.1016/j.precamres.2018.04.009.



Кориш Е.Х., Савко К.А., Самсонов А.В., Червяковская М. В. Палеопротерозойские диориты Троснянского массива Курского блока Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // Вестник ВГУ, геол. 2020. № 1. С. 87–99. doi:10.17308/geology.2020.1/2517

Савко К.А., Самсонов А.В., Базиков Н.С., Козлова Е.Н. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов// Вестник ВГУ, геол. 2014. № 2. С. 56-78.

Савко К.А., Кориш Е.Х., Базиков Н.С., Цыбуляев С.В., Червяковский В.С., Холина Н.В., Хуссейн И. Палеопротерозойские гранодиориты I-типа Луневского массива в Курском блоке Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов// Вестник ВГУ, геология. 2021. № 4. С. 4–23. doi: 10.17308/geology.2021.4/3787

Цыбуляев С.В., Савко К.А., Самсонов А.В., Кориш Е.Х. Палеопротерозойские рифтогенные вулканиты OIB- и MORB-типа Курского блока восточной Сарматии: петрология и геодинамика// Петрология. 2021. № 2. С. 136-171. doi: 10.31857/S0869590321020060



УДК 553.2

**ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ
ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГРАНУЛИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ
СЕВЕРА АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА**

А. А. Кравченко¹, Г. С. Анисимова¹, В. И. Берёзкин¹, Н. В. Попов², Е. Е. Лоскутов¹, А. И. Журавлёв¹

¹*Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия, freshrock@yandex.ru*

²*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия*

Проблемы металлогенической специализации раннедокембрийской континентальной земной коры в различных по составу и обстановкам формирования метаморфических комплексах имеют актуальное значение для развития региональной металлогении. В работе рассмотрены геологическое строение, особенности минерального и вещественного состава месторождений и пунктов минерализации в палеопротерозойских гранулитовых комплексах Алдано-Станового щита. Выполнено сопоставление особенностей состава с рудными месторождениями в свекофенидах Балтийского щита как хорошо изученной складчатой области. Сделан вывод о сходстве металлогенической специализации метаморфических комплексов.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит, палеопротерозой, рудная минерализация.

**ORE MINERALIZATION IN PALEOPROTEROZOIC GRANULITE COMPLEXES
OF THE NORTH OF THE ALDAN-STANOVY SHIELD**

A. A. Kravchenko¹, G. S. Anisimova¹, V. I. Beryozkin¹, N. V. Popov², E. E. Loskutov¹, A. I. Zhuravlev¹

¹*Diamond and Precious Metal Geology Institute of Siberian Branch RAS, Yakutsk, Russia*

²*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia*

The problems of metallogenic specialization of the Early Precambrian continental crust in metamorphic complexes of various composition and conditions of formation are of urgent importance for regional metallogeny development. The paper considers the geology, features of the mineral and material composition of deposits and points of mineralization in the Paleoproterozoic granulite complexes of the Aldan-Stanovoy shield. A comparison of the features of composition with those of the ore deposits in the Svecofennides of the Baltic Shield as an well studied folded region has been performed. The conclusion was made about the similarities of metallogenic specialization of the metamorphic complexes.

Keywords: Aldan-Stanovoy shield, Paleoproterozoic, ore mineralization.

Длительный период становления Алдано-Станового щита (3,5-1,7 млрд лет) сопровождался неоднократными процессами метаморфизма, магматизма и деформации, что обусловило его сложное строение [Котов, 2003]. В настоящее время в тектонической структуре щита выделяется несколько крупных блоков - составных террейнов и супертеррейнов, ограниченных крупными разломами и зонами тектонического меланжа [Смелов и др., 2001a]. Формирование расположенных в северной части щита гранулитогнейсовым Нимнырского и Учурского террейнов и отделяющих их структур связывается предшественниками с субдукцией, коллизией микроплит, микроконтинентов и островных дуг [Mints et al., 2000]. Металлогения щита изучена в значительно меньшей мере чем Балтийского [Турченко, 2007]. Описаны главным образом месторождения железа, флогопита и апатита [Mints et al., 2000; Металлогения..., 1999]. Полиметаллическая минерализация упоминалась изредка как сопутствующая [Смелов и др., 2001b]. В последние десятилетия специалистами предприятия Якутскгеология открыты новые докембрийские золоторудные объекты.

Обнаружение объектов с неизвестными ранее типами минерализации делает актуальным изучение вещественного состава метаморфических комплексов. Нашим коллективом при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD изучены составы рудных минералов. Рентгено-флуоресцентным анализатором Niton XL3tGOLDD определены содержания элементов-примесей в различных горных породах. Проведен факторный анализ их содержаний.

В кристаллических сланцах и амфиболитах золоторудных объектов и склоновых отложений бассейнов золотых россыпей минерализация встречается на участках повторного рассланцевания и метаморфической полосчатости в пространственной связи с кварцевыми жилами. Обнаружены сульфидно-арсенидные метаморфогенно-гидротермальные руды. Золото сконцентрировано в лёллингите, встречается самородное золото и мальдонит. В золотосодержащих породах часто встречаются: арсенопирит, никелин, кобальтин, пирротин и висмут. В нескольких пробах обнаружены серебро и антимонит. Состав руд схож с гипо- и мезозональными орогенными месторождениями [Groves et al., 2020].

В диопсидовых породах магнезиальных скарнов сопровождающих флогопитовую и магнетитовую минерализацию обнаружены золото, серебро, шеелит, молибдошеелит, зигенит, халькопирит и сфалерит. В пространственно-сопряжённых со скарнами кварцевых породах с графитом встречены сфалерит и халькопирит, микровключения металлов: самородной меди с примесями олова и никеля, кобальта с примесью вольфрама, вольфрама, золота и серебра. Содержания некоторых из металлов в скарнах и кварцитах ранее оценивались предшественниками с целью попутной добычи.

В диафоритах по кристаллическим сланцам основного состава и метадiorитам обнаружены сульфидная и золотая минерализация в ассоциации с зонами катаклаза, эпидотовыми замещениями, прожилками и выделениями хлорита. В диафоритах по кристаллосланцам диагностированы борнит, халькозин, теллуриды и самородное золото с примесями меди, висмута, теллура. В диафоритах по метадiorитам встречаются пирит и халькопирит, флюорит и галенит, золото.

Результаты факторного анализа содержаний элементов-примесей по совокупности различных пород показали близкое распределение Au, Ag, As, Sb, W, Mo, Zn, Co, Fe с одной стороны, Cr, Cu, Ni, S, Te, Pd с другой, что в общих чертах отражает профили описанных выше типов минерализации.

В свекофенидах Балтийского щита [Горячев, 2014] минералами орогенных месторождений золота являются: пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, лёллингит, сфалерит, галенит, кобальтин, пентландит, тетраэдрит, аурустибит, мальдонит, самородные Bi, Sb, Ag, теллуриды Bi, Pb, Fe, Ni, золото, серебро и др. Здесь также описаны скарновые месторождения с магнетитовым и сульфидным полиметаллическим оруденением (Fe-Mn, Fe-Co-Ni, Fe-апатитовые, Cu-Pb-Zn, Au-Bi-Se, W-Mo) и кварциты с полиметаллической минерализацией и связанные с эпидот-хлоритовыми замещениями борнитовые руды с золотом [Mineral..., 2012; Кулешевич, Лавров, 2013].

Металлогеническая специализация и рудные минеральные ассоциации палеопротерозойских метаморфических комплексов Алдано-Станового и Балтийского щитов имеют определенные черты сходства, причины чего предстоит изучить.

Благодарности и источник финансирования. Исследования выполнены в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН и договорных работ с АО «Золото Селигдара»

Литература

Горячев Н. А. благороднометалльный рудогенез и мантийно-коровое взаимодействие // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 323–332.

Котов А. Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. // Автореф. дисс. док. геол.-минер. наук. Спб. 2003. 78 с.



Кулешевич Л. В., Лавров О. Б. Типоморфные особенности золота докембрийских месторождений и проявлений Карелии // Золото Фенноскандинавского щита. Материалы Международной конференции. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2013. С. 109-112.

Металлогения рядов геодинамических обстановок раннего докембрия / [Д. В. Рундквист, М. В. Минц, А. М. Ларин и др.]; [Редкол.: Г. С. Гусев (отв. ред.) и др.]. М.: МПР РФ и др. 1999. 398 с.

Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Алдано-Становой щит // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2001а. С. 81-103.

Смелов А.П., Никитин В.М., Бирюлькин Г.В., Попов Н.В., Стогний В.В. Каларо-Учурский раннепротерозойский коллизионный металлогенический пояс // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2001б. С. 306-316.

Турченко С. И. Металлогения тектонических структур палеопротерозоя. Спб.: Наука. 2007. 175 с.

Groves D. I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration // Mineralium Deposita. 2020. 55. Pp. 275–292.

Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia / Eilu, P. (ed.). Geological Survey of Finland, Special Paper 53. 2012. 401 p.

Mints M. V., Rundqvist D. V., Larin A. M., Nenakhov V. M., Rytsk E. Yu., Turchenko S. I., and Chernyshov N. M. Early Precambrian Geodynamics and Metallogeny // Geodynamics and Metallogeny: Theory and Implications for Applied Geology. Moscow. 2000. Pp. 105-191.

УДК 553.411 (470.21)

**АРХЕЙСКАЯ ЭПОХА РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО (Li, Cs) ПЕГМАТИТООБРАЗОВАНИЯ
В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА**

Н.М. Кудряшов¹, Е.В. Галеева¹, О.В. Удоратина², А.А. Калинин¹, М. Гроув³

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, nik@geoksc.apatity.ru

²Институт геологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар, Россия

³Стэнфордский Университет, Стэнфорд, Калифорния, США

Приведены результаты изотопно-геохронологического изучения циркона из редкометалльных пегматитов месторождения Охмыльк и Васин-Мыльк. До настоящего времени не было достоверных данных о возрасте лепидолит-сподумен-поллуцитовых пегматитов архейского зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья. Предполагаемые оценки указывали на довольно широкий временной диапазон от 2.7 до 1.7 млрд лет. Новые U-Pb (SHRIMP-RG) изотопно-геохронологические данные по циркону из пегматитовых жил месторождения Охмыльк с возрастом 2607 ± 9 млн лет и 2619 ± 29 млн лет для месторождения Васин-Мыльк отражают время их кристаллизации. Полученные результаты свидетельствуют о неоархейском времени образования месторождений на рубеже 2.65-2.60 млрд лет, отражая глобальную эпоху архейского редкометалльного пегматитообразования. Изотопные данные с возрастом ~ 1.7 -1.6 млрд лет указывают на более поздние гидротермально-метасоматические преобразования.

Ключевые слова: Редкометалльные (Li, Cs) пегматиты, U-Pb изотопный возраст, SHRIMP-RG, циркон, месторождения Охмыльк и Васин-Мыльк, Фенноскандинавский щит.

THE ARCHEAN STAGE OF RARE METAL (Li, Cs) PEGMATITE FORMATION IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD

N.M. Kudryashov¹, E.V. Galeeva¹, O.V. Udoratina², A.A. Kalinin¹, M. Grove³

¹Geological Institute of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

²Institute of Geology, Komi Scientific Center of the RAS, Komi, Russia

³Stanford University, Department of Geological Sciences, Stanford, California, USA

The results of isotope geochronological study of zircons from rare metal pegmatite deposits Okhmyl'k and Vasin-Myl'k are presented. Up to date no reliable data on the age of pollucite-spodumene-lepidolite pegmatite veins in the Archean greenstone belt Kolmozero-Voron'ya were available, the age estimations varied within a long time interval from 2.7 to 1.7 Ga. New U-Pb (SHRIMP-RG) data for zircons indicate crystallization of pegmatite at 2607 ± 9 Ma in the Okhmyl'k and 2619 ± 29 in the Vasin-Myl'k. This age corresponds to the global Archean stage of rare metal pegmatite formation at 2.65 – 2.60 Ga. Isotope data for ~ 1.7 – 1.6 Ga indicate the age of the late hydrothermal-metasomatic processes in pegmatite veins.

Key words: rare metal (Li, Cs) pegmatite, U-Pb isotope age, SHRIMP-RG, zircon, Okhmyl'k and Vasin-Myl'k deposits, Fennoscandian Shield

Один из подходов к систематическому изучению эволюции Земли - это анализ глобальных геологических эпох [Bradley, 2011]. Выявление и обоснование подобных эпох в развитии планеты основаны, прежде всего, на сборе данных из большого количества опубликованных работ по распределению возрастных определений для пород и минералов. Месторождения редкометалльных пегматитов присутствуют на всех континентах и охватывают порядка 3 млрд лет истории Земли, начиная с мезоархея. Глобальное возрастное распределение эпох редкометалльного пегматитообразования сходно с распределением обычных пегматитов, орогенных гранитов и детритовых цирконов. Пиковые временные импульсы образования пегматитов приходятся на

рубежи около 2640, 1800, 960, 485 и 310 млн лет назад и соответствуют временам коллизионного орогенеза и сборки суперконтинентов. Между этими импульсами были длительные промежутки времени, когда пегматиты формировались в незначительных масштабах или вообще не образовывались [Tkachev, 2011; McCauley and Bradley, 2014]. Среди архейских крупных месторождений семейства LCT (литий-цезий-тантал) можно отметить пегматиты Гринбушес в Западной Австралии (возраст 2527 млн лет), пегматиты Бикита в Зимбабве (~ 2650 млн лет) и пегматиты Танко в Канаде (2640 млн лет).

Крупные месторождения редкометалльных LCT пегматитов, которые выделяются в северо-восточной части Фенноскандинавского щита, сконцентрированы в зеленокаменном поясе Колмозеро-Воронья. Пояс расположен в зоне глубинного разлома на границе трех крупных блоков Мурманского, Кольско-Норвежского и Кейвского, сложен преимущественно метаморфизованными осадочно-вулканогенными породами позднеархейского возраста (2.9-2.8 млрд лет). Породы осадочно-вулканогенного комплекса прорываются более поздними (2,73-2,68 млрд лет) высокомагнезиальными интрузиями дифференцированной серии габбро-гранодиорит-гранитного состава (санукитоиды), а также турмалин-мусковитовыми и микроклиновыми гранитами (2,7-2,5 млрд лет). В пределах пояса расположены два крупных поля редкометалльных пегматитов (Li, Cs с попутными Nb, Ta, Be). В северо-западной части располагаются месторождения лития и цезия Охмыльк, Васин-Мыльк, Оленинское и Полмостундра, в юго-восточной части – крупнейшее литиевое месторождение сподуменовых пегматитов Колмозерское. Месторождения пегматитов, размещенные в северо-западной части обнажаются среди амфиболитов пояса, Колмозерские сподуменовые пегматиты прорывают интрузивное тело габбро-анортозитов Патчемварекского массива с возрастом 2.93 млрд лет [Кудряшов, Мокрушин, 2011].

Изотопно-геохронологические определения жил различных пегматитов и гранитоидов, выделяемых в пределах пояса, по имеющимся данным охватывают довольно широкий временной диапазон 2.7-1.7 млрд лет. В последние годы были получены новые изотопно-геохронологические результаты для гранитоидов, как возможных источников вещества для редкометалльных пегматитов. Возрастные данные для турмалин-мусковитовых гранитов северо-западного поля оцениваются в ~ 2.6-2.5 млрд лет, для юго-восточной части пояса, в районе размещения сподуменовых пегматитов Колмозерского месторождения, определен возраст турмалин-мусковитовых гранитов 2.8-2.7 млрд лет [Kudryashov et al., 2020]. Эти разрозненные данные, до настоящего времени, не позволяли дать точную оценку возраста каждого из месторождений, поэтому были поставлены задачи изотопно-геохронологического изучения циркона из пегматитовых жил локальным U-Pb (SHRIMP-RG) методом.

Месторождение Охмыльк. Пегматитовое поле месторождения занимает площадь около 600 м², прослеживается по простирацию на 1.25 км и характеризуется высокой насыщенностью пегматитовыми жилами. Для геохронологического изучения была взята проба из жилы лепидолит-турмалин-сподуменового состава. Циркон, выделенный из пробы, представлен идиоморфными, изометричными и близкими к изометричным дипирамидальными и дипирамидально-призматическими полупрозрачными трещиноватыми кристаллами, реже ксеноморфными зернами серого, серо-коричневого цвета. Размеры не превышают 1 мм и наиболее часто составляют 0.3-0.5 мм. Индивиды циркона развиты преимущественно с альбитом и кварцем, присутствуют сростания циркона с минералами группы колумбита. Внутреннее строение циркона характеризуется центральными участками в виде пятнистой текстуры с включениями урановых оксидов, во внешних частях некоторых кристаллов отчетливо выделяются узкие участки с признаками поздней перекристаллизации.

Для 4 проанализированных точек циркона из центральных зон получен дискордантный возраст 2607±9 млн лет, СКВО=0.87 (рис. 3), который отражает время формирования пегматитов месторождения Охмыльк. Аналитические данные 2-х точек из перекристаллизованных зон составили 1719±65 млн лет и 1666±23 млн лет, что указывает на более поздние, вероятно, метасоматически-гидротермальные процессы.

Месторождение Васин-Мыльк. Пегматитовое поле месторождения Васин-Мыльк с продуктивной ассоциацией лепидолит-альбит-микроклин-сподумен-поллуцит расположено среди амфиболитов. Незначительные по размеру участки выходов пегматитов на поверхность прослежены на глубину при прохождении шурфов и скважин. Месторождение представляет собой субпараллельные пологие зональные жилы протяженностью до 220 м при мощности 5 м. Среди разнообразных минералов, часто представленных в пегматитовых жилах несколькими генерациями, к наиболее ранним относятся минералы группы колумбита-танталита, микролит, симпсонит, торолит, циркон [Волошин, Пахомовский, 1988]. Ранее был проанализирован микролит ранней генерации U-Pb (ID TIMS) методом, возраст которого составил 2454 ± 8 млн лет [Кудряшов и др., 2015]. Циркон из пегматитовых жил здесь представлен двумя резко отличающимися по составу генерациями: высокоурановые единичные кристаллы ранней генерации, а также основная масса практически безуранового высокогафниевого циркона поздней генерации. Для циркона поздней генерации, в котором содержания урана составляли всего 0.2-0.3 ppm, не представлялось возможным определение U-Pb возраста [Kudryashov et al., 2019]. U-Pb методом были проанализированы несколько кристаллов циркона ранней генерации. Циркон этой генерации представлен идиоморфными, изометричными дипирамидально-призматическими полупрозрачными трещиноватыми кристаллами темно-коричневого и серого цвета. Внутреннее строение циркона характеризуется фазовой неоднородностью, где выделяются центральные и краевые зоны. Центральные зоны обогащены ураном, РЗЭ и иттрием, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0.01-0.02$. Краевые участки содержат значительно меньшие концентрации урана, иттрия и РЗЭ, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0.3-0.8$.

Для 4 проанализированных точек циркона из центральных зон получен близконкордантный возраст 2619 ± 29 млн лет, СКВО=2.2 (рис. 1), который отражает время формирования пегматитов месторождения Васин-Мыльк. Аналитические данные 3-х точек из краевых зон по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ составили 1.9-1.6 млрд лет, что указывает на более поздние события.

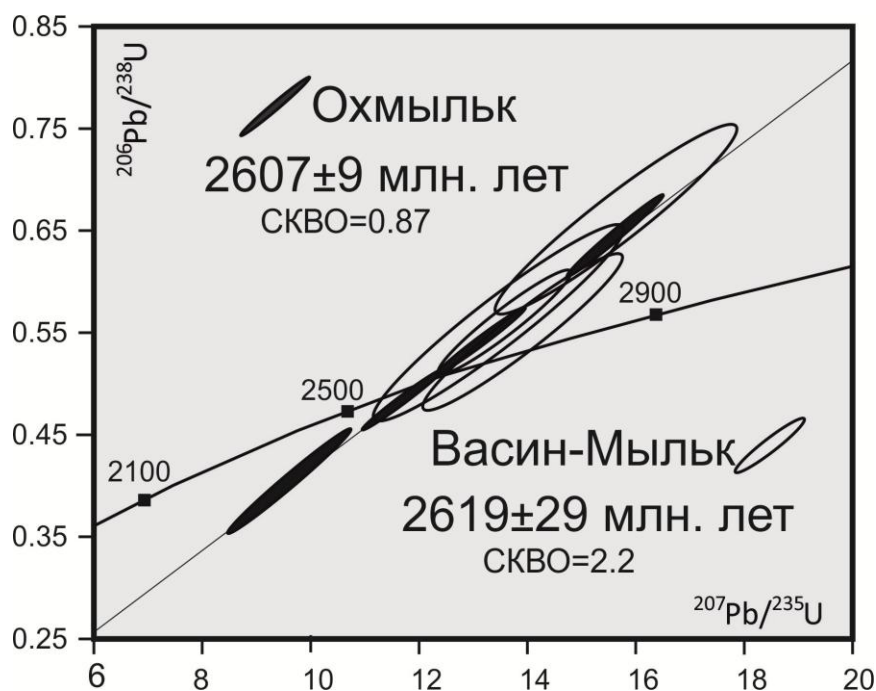


Рис. 1. Диаграмма с конкордией для магматического циркона из месторождений Охмыльк и Васин-Мыльк
 Fig. 1 Concordia diagram for the magmatic zircon from the Okhmyl'k and Vasin-Mil'k deposits.

Полученные изотопные возрасты магматического циркона 2607 ± 9 млн лет для месторождения Охмыльк и 2619 ± 29 млн лет для месторождения Васин-Мыльк служат надежной оценкой времени их кристаллизации, отражая глобальную эпоху пегматитообразования, с которой связаны формирования крупнейших мировых редкометалльных месторождений на рубеже 2.60-2.65 млрд лет. Образование внешних кайм связано с полной перекристаллизацией циркона в палеопротерозойское время на рубеже 1,7-1,6 млрд лет назад. Анализ литературных данных показывает, что основные геолого-минералогические и геохимические характеристики LCT пегматитов со временем практически не изменялись. Тем не менее, отмечается, что архейские LCT пегматиты образовались из метаглиноземистых исходных расплавов, в отличие от более молодых пегматитов, связанных с перглиноземистыми расплавами (Martin, De Vito, 2005). Этот вывод подтверждается и изучением древнейшего (хадейского) обломочного циркона Джек-Хиллз (Trail et al., 2017).

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №22-27-00589.

Литература

- Волошин А. В., Пахомовский Я. А. Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. Л.: Наука. 1988. 240 с.
- Кудряшов Н. М., Мокрушин А. В. Мезоархейский габбро-анортозитовый магматизм Кольского региона: петрохимические, геохронологические и изотопно-геохимические данные // Петрология. 2011. Т. 19, № 2. С. 173-189.
- Кудряшов Н. М., Лялина Л. М., Апанасевич Е. А. Возраст редкометалльных пегматитов месторождения Васин-Мыльк (Кольский регион): результаты геохронологического U-Pb- исследования микролита // ДАН. 2015. Т 461. № 4. С. 437-441.
- D. C. Bradley. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle // Earth-Science Reviews. 2011. V. 108. Iss. 1-2. P. 16-33. DOI:10.1016/j.earscirev.2011.05.003
- N. M. Kudryashov, O. V. Udoratina, M. Coble, E. N. Steshenko. Geochronological and Geochemical Study of Zircon from Tourmaline-Muscovite Granites of the Archaean Kolmozero-Voronya Greenstone Belt: Insights into Sources of the Rare-Metal Pegmatites // Minerals. 2020. V.10(9).760. DOI: 10.3390/min10090760
- N. M. Kudryashov, S. G. Skublov, O. L. Galankina, O. V. Udoratina, A. V. Voloshin. Abnormally high-hafnium zircon from rare-metal pegmatites of the Vasin-Mylk deposit (the northeastern part of the Kola Peninsula) // Chemie der Erde. Geochemistry. 2019. V. 80. № 3. DOI: 10.1016/j.geoch.2018.12.001
- R. F. Martin, C. De Vito. The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting: Canadian Mineralogist. 2005. V. 43. P. 2027–2048.
- A. McCauley, D. C. Bradley. The global age distribution of granitic pegmatites // Can. Mineral. 2014. V. 52. P. 183-190. DOI: 10.3749/canmin.52.2.183
- A. V. Tkachev. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time. Geological Society, London, Special Publications. 2011. V. 350. P. 7-23. DOI: 10.1144/SP350.2
- D. Trail, N. Tailby, Y. Wang, T. M. Harrison, P. Boehnke. Aluminum in zircon as evidence for peraluminous and metaluminous melts from the Hadean to present // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. V. 18. Iss. 4. P. 1580-1593. DOI 10.1002/2016GC006794



МИНЕРАЛОГИЯ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО ДУБРАВИНСКОГО МАССИВА.

Н.М. Лебедева, А.А. Носова¹

¹ *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, namil@mail.ru*

В работе установлены минералого-геохимические и петрографические особенности силикатных пород, фоскоритов и карбонатитов палеопротерозойского Дубравинского комплекса. Выделены минералы, которые образовались при метаморфизме комплекса и поздней гидротермальной проработке, проведено сравнение с девонскими щелочно-карбонатитовыми массивами Фенноскандии.

Ключевые слова: щелочно-карбонатные комплексы, метаморфизованные карбонатиты

MINERALOGY OF THE PALEOPROTEROZOIC ALKALINE-CARBONATITE DUBRAVINSKII COMPLEX

N.M. Lebedeva¹, A.A. Nosova¹

¹ *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow*

We investigate mineralogical and petrography features of silicate rocks, phoscorites and carbonatite of the paleoproterozoic Dubravinskii complex. Some minerals were formed during the metamorphic event and late hydrothermal stage. We compare minerals with the Devonian alkaline-carbonatite massifs data (Fennoscandia).

Key words: alkaline-carbonatite complex, metamorphic carbonatite

Разновозрастные щелочно-карбонатитовые комплексы распространены в пределах Фенноскандии и Сарматии. Например, архейский массив Siilinjärvi [Brien et al., 2015], протерозойские комплексы в пределах Азовско-Курского домена [Савко и др, 2022] и палеозойские массивы и дайки Фенноскандии [Nosova et al., 2021]. Дубравинский массив расположен в Курском блоке Сарматии, имеет возраст 2.07 млрд [Савко и др, 2022]. Карбонатиты и силикатные породы были пластически деформированы и метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации [Савко и др., 2002], что определило в значительной мере специфику минерального состава и характер распределения рудных компонентов.

Метаморфизованные карбонатитовые комплексы не очень подробно описаны в современной литературе и остаются открытыми вопросы о том, как при метаморфизме менялись геохимические и изотопные характеристики карбонатитов, как происходило преобразование рудных компонентов. Мы обсудим петрографию Дубравинского массива и закономерности состава минеральных ассоциаций и минералов в зависимости от типа пород.

Петрография: Силикатные породы массива представлены в основном щелочными пироксенитами, и отдельными прослоями глиммеритов и амфиболовых сланцев. Они могут тонко переслаиваться между собой, и одна разность породы сменяются на другую в пределах одного шлифа.

Щелочные пироксениты средне и крупнозернистые, имеют массивную текстуру, иногда слабовыраженную полосчатость. Сложены клинопироксеном, титанитом, флогопитом, амфиболом, карбонатом, магнетитом, ильменитом и сульфидами. Карбонат представлен в виде прожилков и отдельных скоплений, вдоль которых клинопироксен замещается флогопитом. Амфиболовые сланцы имеют полосчатую текстуру, амфибол и слюда чередуются между собой. Глиммериты представлены чешуйками флогопита (до 85 %) с небольшим количеством амфибола и/или клинопироксена, в качестве аксессуарных присутствует карбонат, ильменит, титанит. Карбонатиты представляют собой массивные, среднезернистые породы с массивной и слабо

выраженной полосчатой текстурой. Аксессуарными минералами являются ильменит, рутил, сульфиды, монацит. Полосчатость определяется ориентировкой зерен слюды, амфибола, магнетита и сульфидов. Фоскориты представляют небольшие прослои в карбонатах и состоят из апатита, магнетита, рихтерита, слюды. В качестве аксессуарных присутствует клинопироксен, сульфиды и циркон. Слюда обрастает магнетит.

Химический состав минералов: Клинопироксен в пироксенитах и глиммеритах не зональный, состав меняется в зависимости от присутствия в породе карбонатного вещества, чем его больше, тем сильнее увеличивается доля эгиринового компонента $Di_{0.47-0.71}Aeg_{0.09-0.53}Hd_{<0.49}$. В карбонатитах и фоскоритах доля эгиринового компонента сильно возрастает $Di_{<0.36}Aeg_{0.48-0.88}Hd_{<0.02}$.

Во всех изученных породах большинство карбонатов являются кальцитами, но есть области, обогащенные доломитом. В отдельных зонах присутствует анкерит ($Fe=1.51$ ф.е.), доломит ($Mg \leq 0.8$ ф.е.) и мелкие зерна карбоната, состав которого сдвигается в сторону большего содержания Sr (до 0.2 ф.е.). Весь изученный апатит является F-содержащим (до 3 мас. %), достаточно однородным по составу (рис. 1а). Содержание SrO достигает 1.75 мас. % в карбонатитах. Магнетит встречается с ламелями ильменита в пироксенитах, в виде растворенных кристаллов в карбонатите (рис. 1а) и магнетит-ильменитовых сростков в фоскорите. Ильменит в глиммерите встречается в виде отдельных зерен в котором находятся мелкие включения колумбита (рис. 1б). Изученные слюды Дубравинского комплекса имеют низкое содержание Al_2O_3 (до 15.37 мас. %), по сравнению с породами Ковдора, лампрофирами и карбонатитами Терского берега [Rass et al., 2020, Beard et al., 1996, Nosova et al., 2021]. Слюда в пироксенитах, глиммеритах, амфиболовых сланцах и сиенитах Дубравинского массива в основном являются высоко-Mg биотитами, в карбонатитах и фоскоритах содержание Al_2O_3 резко сокращается и составы стремятся к тетраферрифлогопитам.

Большинство сульфидов Дубравинского комплекса представлены пирротинном, пиритом, халькопиритом и по петрографии находятся в обогащенной карбонатом зоне. В некоторых образцах пирит и халькопирит обрастают ламеллы магнетита и ильменита. Иногда вокруг этих зерен образуются зоны магнетита с кварцем.

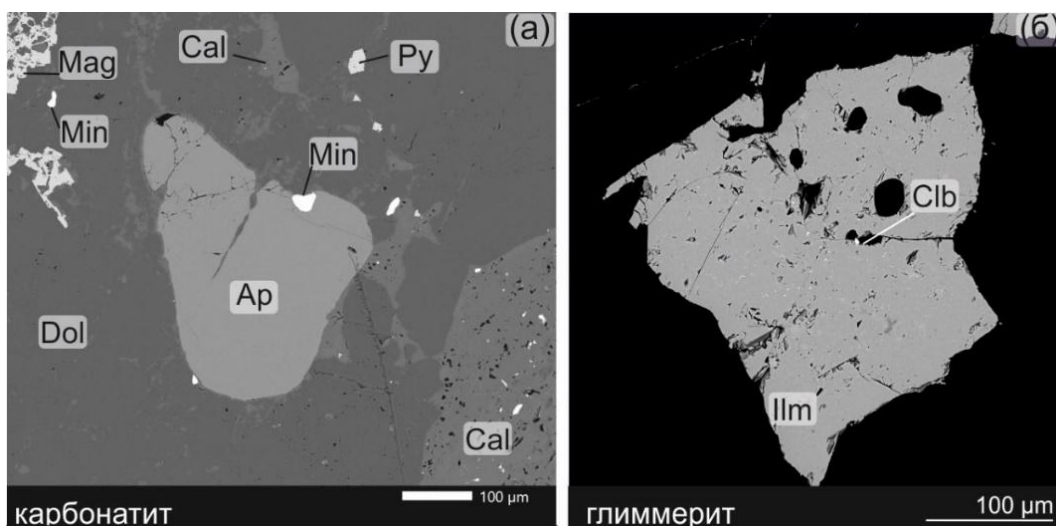


Рис. 1 (а) Кристалл апатита в карбонатите на границе которого образовался Се-монацит (Min). Основная масса представлена доломитом (Dol) с неоднородными зернами кальцита (Cal) с включениями высоко-Sr разновидностей, растворенным магнетитом (Mag) и зерном пирита (Py); (б) зерно ильменита в глиммерите с мелкими ориентированными включениями Nb-фазы и более крупным зерном колумбита (Clb).

Fig. 1 (a) Apatite crystals in carbonatite and Ce-monazite on the apatite boundary (Min). There are magnetite (Mag), pyrite (Py) and heterogeneous calcite crystals with high-Sr zone in dolomite (Dol) matrix; (б) small oriented Nb-rich and columbite (Clb) inclusions in ilmenite crystals



Выводы: По химическому составу минералов и текстурным особенностям пород можно выделить три этапа в формировании комплекса: 1) магматический, в который сформировался карбонат, диопсид, амфибол, апатит, магнетит, ильменит, и циркон; 2) метаморфический этап, который привел к избавлению от примесей существующих минералов и появлению новых фаз, таких как стронцианит, титанит, монацит, эгирин и 3) гидротермальный этап в который сформировались сульфиды и магнетит-кварцевые сростки.

Литература

Савко К.А., Кальмуцкая Н.Ю. Петрология недосыщенных калием метапелитов Воронежского кристаллического массива с рассмотрением парагенезиса оливин-жедритортопироксен-гранат магнетит// Петрология. 2002. 10(3) С. 283-311.

Савко К.А., и др. Сложности геохронологических исследований метаморфизованного раннедокембрийского щелочно-карбонатитового комплекса Курского блока Сарматии// VII Российская конференция по изотопной геохронологии. ИГГД РАН, Санкт-Петербург. 7-10 июня 2022.

Beard B. L., Fraracci K. N., Taylor L. A. et al. Petrography and geochemistry of eclogites from the Mir kimberlite, Yakutia, Russia // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1996. P. 125. P. 293–310. <https://doi.org/10.1007/s004100050223>

Brien H. O., Heilimo E., Heino P. THE ARCHEAN SIILINJÄRVI, Minerals Deposits of Finland. 2015. Chapter 4. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00013-3>

Nosova A. A. et al. Petrology of lamprophyre dykes in the Kola Alkaline Carbonatite Province (N Europe) // Lithos. 2021. V. 398. P. 106277.

Rass I. T., Petrenko D. B., Koval'chuk E. V., Yakushev A. I. Phoscorites and carbonatites: relations, possible petrogenetic processes, and parental magma, with reference to the Kovdor Massif, Kola Peninsula // Geochemistry International. 2020. V.58(7). P. 753-778.



УДК 551.251:551.24

РЕКОНСТРУКЦИЯ P - T - t ТРЕНДОВ И ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНЫХ ПРИЧИН МЕТАМОРФИЗМА В ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ КОЛЛИЗИИ, РАСТЯЖЕНИЯ И СДВИГОВЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ

И. И. Лиханов

Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, likh@igm.nsc.ru

Эффективным методом для выяснения тектоно-магматических причин метаморфизма является реконструкции и анализ P - T - t трендов эволюции пород. Установлены диагностические P - T - t тренды, характерные для пород, сформированных в зонах активного тектогенеза – при растяжении и сжатии земной коры и в сдвиговых зонах. Приведено критическое обсуждение характера таких трендов – «по» или «против часовой стрелки» в полициклических комплексах со сложным развитием.

Ключевые слова: P - T - t тренды метаморфизма, тектонические обстановки

P - T - t PATHS RECONSTRUCTIONS AND TECTONO-MAGMATIC REASONS OF METAMORPHISM FOR COLLISION, EXTENSION, AND SHEAR ZONE GEODYNAMIC SETTINGS OF THE EARTH'S CRUST

I. I. Likhanov

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB of the RAS, Novosibirsk, Russia

An effective method for identifying tectonic-magmatic causes of metamorphism is the reconstruction and analysis of P - T - t paths, which can be used to develop a tectonic model of rock evolution with time. Diagnostic P - T - t paths characteristic of rocks formed in zones of active tectogenesis – under collision, extension and in shear zones of the earth's crust – have been established. This report discusses some of the ambiguous interpretations of P - T - t paths in areas with simultaneous manifestation of different metamorphic processes.

Keywords: P - T - t paths of metamorphic evolution, tectonic settings

Реконструкция и анализ P - T - t трендов эволюции пород широко применяются при интерпретации эволюции орогенов с полициклической историей, где разные типы метаморфизма сочетаются между собой в контрастных геодинамических обстановках. В докладе эти вопросы обсуждаются на примере геологических комплексов Енисейского кряжа, в составе которых исследованы проявления регионального LP/HT и УНТ гранулитового метаморфизма, коллизионного MP/HT и HP/LT метаморфизма, связанных с надвигами и субдукцией, и стресс-метаморфизма при деформациях пород.

В Заангарье Енисейского кряжа на первом этапе сформировались зональные комплексы низких давлений And-Sil типа гренвилевского возраста при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте $dT/dH=25$ - $35^\circ\text{C}/\text{км}$ [Likhanov et al., 2019]. На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому коллизионному метаморфизму умеренных давлений Ky-Sil типа, в результате чего происходило прогрессивное замещение $\text{And} \rightarrow \text{Ky} \pm \text{Sil}$ [Likhanov, Santosh, 2020]. Формирование более древних пород тейского комплекса происходило в результате надвигов со стороны Сибирского кратона на рубеже 850 млн лет [Likhanov et al., 2004]. Поздний коллизионный метаморфизм пород гаревского комплекса контролировался встречными движениями в ходе аккреционных событий вальгальской складчатости (~800 млн лет) [Likhanov, 2019] (рис. 1а).

Низкий метаморфический градиент от 7 до $14^\circ\text{C}/\text{км}$ обусловлен утолщением земной коры в результате быстрого надвига с последующим быстрым подъемом пород при скоростях процессов около 1-10 мм/год [Likhanov et al., 2015]. Различия в направлении движения регрессивных ветвей, определяющих итоговую траекторию P - T - t трендов, контролируются разными скоростями и механизмами эксгумации: эрозионной денудацией перекрывающих комплексов («по часовой стрелке» - CW), или тектонической транспортировкой

при растяжении земной коры («против движения часовой стрелки» (CCW). Декомпрессионное остывание с низким $dT/dH \leq 12^\circ\text{C}/\text{км}$ пород гаревского комплекса могло быть связано с быстрой тектонической эксгумацией при растяжении и утонении коры, обеспечивающей резкий сброс давления не успевающей остыть среды (рис. 1а), что подтверждается их синхронностью с рифтогенными продуктами бимодального магматизма [Likhanov, Santosh, 2017, 2019]. Комплексы с субизобарическим остыванием образуются в условиях длительного охлаждения на средне-нижнекоревых уровнях глубинности. В качестве примера приведена эволюция P - T параметров с ходом «против часовой стрелки» при высоком градиенте до $200^\circ\text{C}/\text{кбар}$, указывающая на развитие УНТ парагенезисов Ангаро-Канского блока при сильном прогреве 900 - 1000°C с последующим субизобарическим остыванием (рис. 2а). Такие условия отвечают обстановкам внутриплитного растяжения, сопровождаемого андерплейтингом базитовых расплавов в связи с предполагаемой активностью Тимптонского мантийного плюма (~1750 млн лет) [Лиханов и др., 2016]. Рассчитанные значения температур хорошо согласуются с условиями формирования УНТ гранулитов сапфиринсодержащих гранулитов Анабарского щита (рис. 2b) [Ножкин и др., 2019].

В пределах Приенисейской региональной сдвиговой зоны (ПРСЗ) породы подвергались интенсивным деформациям с перекристаллизацией субстрата и образованием высокобарических тектонитов (рис. 1b) [Likhanov et al., 2018]. Полихронный динамометаморфизм происходил с повышением давления на 1.5-3 кбар при низком $dT/dH < 10^\circ\text{C}/\text{км}$ в сравнении с фоновыми значениями регионального метаморфизма, что вероятно было обусловлено утолщением земной коры в результате быстрого надвига/субдукции с последующим быстрым подъемом пород. Максимальные превышения давления на 3-5 кбар и температуры на 180 - 240°C при более высоком градиенте $dT/dH = 15$ - $20^\circ\text{C}/\text{км}$ установлены в тектонитах базитового состава с реликтовыми глаукофансланцевыми ассоциациями (рис. 1b). Такие превышения P - T параметров связаны с прогрессивным метаморфизмом, осложненным локальным разогревом пород при вязких деформациях и превышением тектонического давления над литостатическим в зонах пластического сдвига [Лиханов, 2020].

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена за счет средств гранта РНФ (проект № 21-77-20018).

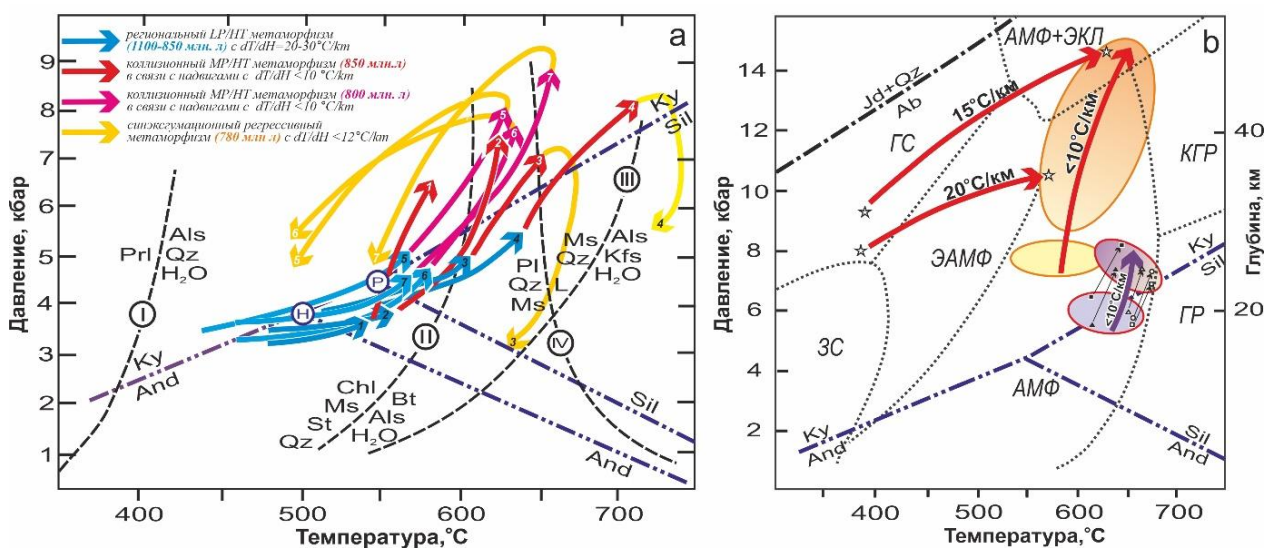


Рис. 1. (а) P - T - t тренды эволюции метаморфизма для метапелитов тейского (1–4) и гаревского (5–7) комплексов Заангарья и (b) для тектонитов ПРСЗ (b).

Fig. 1. (a) P - T - t diagrams showing the generalized P - T path calculations for metapelites in the Teya and Garevka complex and (b) for tectonites of YRSZ.

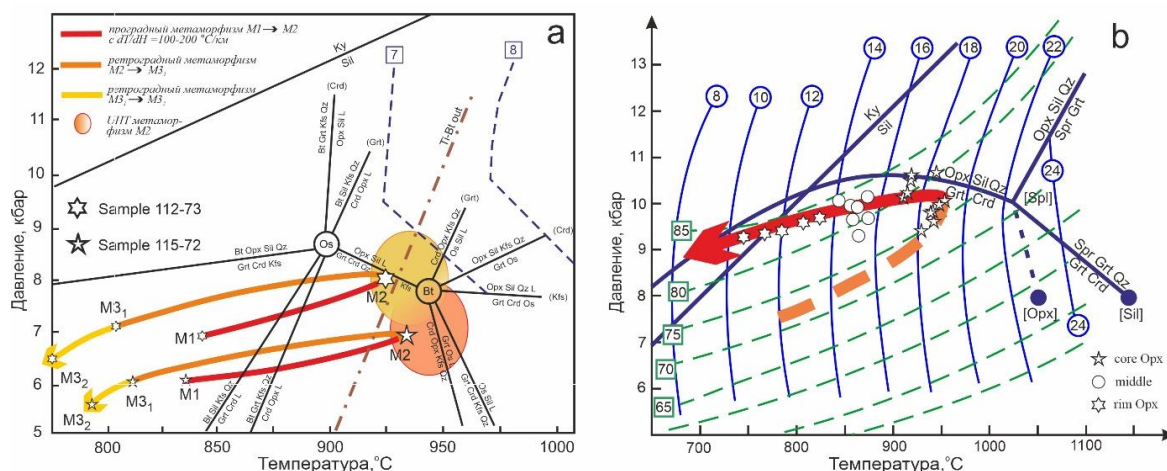


Рис. 2. (а) P - T - t тренды УНТ гранулитов канского комплекса Южно-Енисейского кряжа и (б) Анабарского щита с движением “против часовой стрелки”.

Fig. 2. (a) Counterclockwise P - T path for UHT granulites of the Angara-Kan block and (b) for sapphirine-bearing granulites of the Anabar shield.

Литература

- Лиханов И. И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // *Петрология*. 2020. Т. 28. № 1. С. 4-22. doi: 10.31857/S0869590320010045
- Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Крылов А. А., Козлов П. С., Хиллер В. В. Метаморфическая эволюция ультравысокотемпературных железисто-глиноземистых гранулитов Южно-Енисейского кряжа и тектонические следствия // *Петрология*. 2016. Т. 24. № 4. С. 423–440. doi: 10.7868/S0869590316030055
- Ножкин А. Д., Лиханов И. И., Савко К. А., Крылов А. А., Серов П. А. Сапфириносодержащие гранулиты Анабарского щита // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 5. С. 486–502. doi: 10.31857/S0016-7525645486-502
- Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. In: *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts*. Geol. Society, London, Special Publications. 2019. V. 478. P. 89-115. doi: 10.1144/SP478.11
- Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // *Precambrian Research*. 2017. V. 300. P. 315-331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019
- Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // *Precambrian Research*. 2019. V. 328. P. 128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018
- Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // *Geological Journal*. 2020. V. 55. No. 6. P. 4772-4789. doi: 10.1002/gj.3716
- Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia // *Journal of Metamorphic Geology*. 2004. V. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x
- Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 113. P. 391-410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026
- Likhanov I. I., Régnier J. - L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // *Lithos*. 2018. V. 304-307. P. 468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021



УДК 551.72;551.24.056

**АНОРОГЕННЫЙ МАГМАТИЗМ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО
ПРОЦЕССОВ РАСПАДА СУПЕРКОНТИНЕНТОВ**

И. И. Лиханов

Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, likh@igm.nsc.ru

Рассмотрены геологические, геохимические и изотопно-геохронологические свидетельства мезо- и неопротерозойских событий на западной окраине Сибирского кратона. Время внедрения анорогенных гранитов А-типа представлено двумя пиками – 1380-1360 и 800-720 млн лет. Эти события сопоставляются с этапами распада докембрийских суперконтинентов Нуна и Родиния и подтверждают территориальную близость Сибири и кратонов северной Атлантики (Лаврентии и Балтики) в широком диапазоне времени (1.38–0.72 млрд лет).

Ключевые слова: А-граниты, геохимия, внутриплитная тектоника, геохронология, суперконтиненты

**ANOROGENIC MAGMATISM OF THE YENISEY RIDGE: EVIDENCE FOR BREAKUP OF THE
PRECAMBRIAN SUPERCONTINENTS**

I. I. Likhanov

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB of the RAS, Novosibirsk, Russia

Here we report the occurrence of A-type granites with geochemical features indicating intraplate setting from the Yenisey Ridge. Zircon U–Pb analyses coupled with *in situ* U–Th–Pb geochronology of monazite constrain timing of emplacement of the rift-related granitoids and suggest two consequential breakup events at 1380 Ma and 800–720 Ma. These episodes of regional crustal evolution are correlated with the breakup ages of the Precambrian supercontinents Nuna and Rodinia supercontinents and supports the spatial proximity of Siberia and North Atlantic cratons (Laurentia and Baltica) over the long period 1.38–0.72 Ga.

Keywords: A-type granites, geochemistry, intraplate tectonics, geochronology, supercontinents

Тектоническое строение и эволюция Центрального блока (ЦБ), слагающего большую часть Енисейского кряжа, дискуссионны. ЦБ рассматривают как: (1) экзотический террейн, причленившийся к Сибирскому кратону (СК) ~760 млн лет назад, (2) выход архей-палеопротерозойского фундамента СК, переработанного в ходе последующих тектоно-термальных событий или (3) коллизивно-аккреционную структуру на западе СК, консолидированную в течение мезо-неопротерозойской эволюции [Лиханов и др., 2014, 2018; Likhanov et al., 2004]. С другой стороны, реконструкция геологической истории Енисейского кряжа важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов на границах древних кратонов, но и для решения вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав суперконтинентов Нуны и Родинии.

В этой связи нами рассмотрены геологические, геохимические и изотопно-геохронологические свидетельства мезо- и неопротерозойских событий на западной окраине Сибирского кратона и показано многократное проявление внутриплитного магматизма в обстановках литосферного растяжения, связанных с проявлением плюмовой активности. Объекты исследования, представленные субщелочными гранитоидами, расположены на северо-западе Заангарья Енисейского кряжа в пределах тейского и гаревского комплексов, приуроченных к линейным зонам смятия вдоль Татарско-Ишимбинской (ТИСЗ) и Приенисейской (ПРСЗ) систем разломов.

Рифтогенная природа изученных гранитоидов Заангарья Енисейского кряжа обосновывается их морфологией в виде даек и силлов и/или тектонических пластин и клиньев, приуроченных к зонам региональных разломов, бимодальным составом продуктов магматизма и свойственными для внутриплитных

гранитов А-типа петролого-геохимическими характеристиками пород, которые кристаллизовались из высокотемпературных и водоненасыщенных магм, обогащенных, главным образом, щелочами, железом и некогерентными элементами.

Время их внедрения, зафиксированное по U-Pb датировкам циркона и монацита, представлено двумя пиками – 1380-1360 и 800-720 млн лет, контролируемые процессами растяжения коры в пределах крупных линейных структур региона [Likhanov, Santosh, 2019]. Ранние события синхронны с процессами извержения пикробазальт-базальтовых туфов и лав, формированием рапакивидных гранитов и ассоциирующих субвулканических тел габбро-долеритов и пикритоидов Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса Енисейского кряжа и с одновозрастными событиями на других материках. Активизация магматической деятельности и сопутствующий рифтогенез на рубеже нижнего и среднего рифея на западной окраине Сибирского кратона и в других континентальных блоках маркируют заключительные стадии распада предполагаемого палео-мезопротерозойского суперконтинента Нуна, продолжающиеся вплоть до начала гренвильских событий. Постгренвильские этапы эволюции орогена и начальные процессы растяжения фиксируются дайковыми роями бимодальных ассоциаций анорогенных гранитоидов и внутриплитных базитов с возрастными внедрениями 797-792 млн лет, внедрение которых происходило несколько позднее кульминационного этапа коллизионного метаморфизма [Likhanov, Santosh, 2017]. Последующее развитие региона контролировалось многократным проявлением рифтогенного магматизма, связанного с проявлением плюмовой активности, обусловившей распад суперконтинента Родинии и раскрытие Палеоазиатского океана [Likhanov et al., 2018]. В ТИСЗ выделено несколько эпох (0.78-0.65 млрд лет) формирования рифтогенных структур сопровождавшихся внутриплитным бимодальным, субщелочным кислым, основным и щелочным вулканизмом и интрузивным магматизмом [Лиханов и др., 2018]. В ПРСЗ наиболее широко проявился бимодальный риолит-базальтовый и субщелочной лейкогранитный магматизм с возрастом 720-750 млн лет [Ножкин и др., 2016].

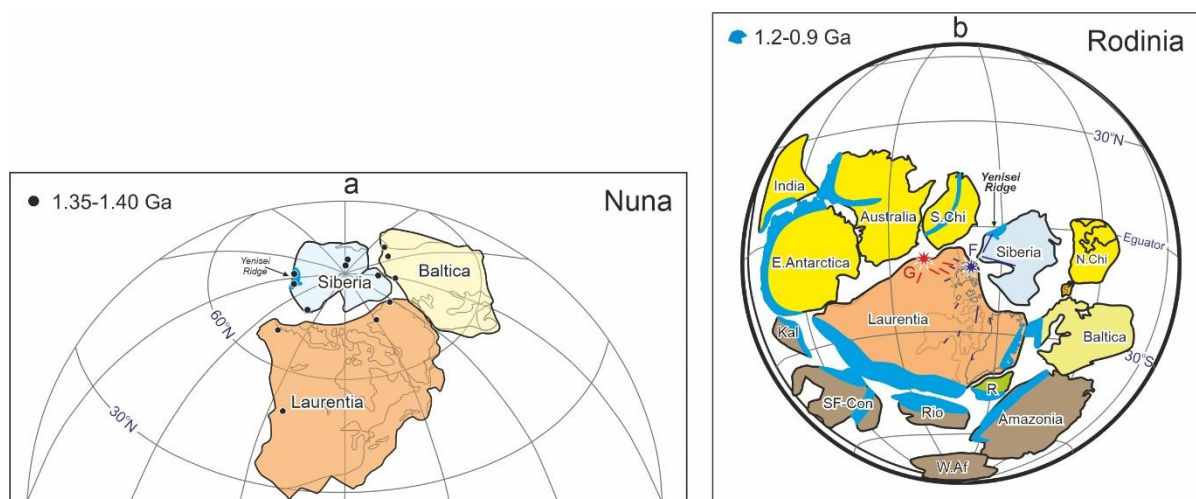


Рис. 1. (а) Реконструкция ядра суперконтинента Нуна в интервале времени 1740-1270 млн лет и (б) конфигурация ядра Родинии и расположение подвижных поясов гренвильской складчатости, показанные голубым цветом (1100-850 млн лет назад).

Fig. 1. (a) Reconstruction of the Nuna supercontinent core in the time interval 1740–1270 Ma and (b) figure shows paleotectonic reconstructions for the position of continents in configuration of Rodinia supercontinent with distribution of Grenvillian (blue) orogens.

Синхронность магматической активности и схожая последовательность тектоно-термальных событий на арктической окраине Нуны и Родинии (рис. 1) подтверждают территориальную близость Сибири и кратонов северной Атлантики (Лаврентии и Балтики) в широком диапазоне времени (1.38-0.72 млрд лет), что согласуется с современными палеомагнитными реконструкциями положения суперконтинентов [Evans, Mitchell, 2011; Torsvik, 2003] и временными диапазонами формирования крупных изверженных провинций [Ernst et al., 2016]. Возрастной интервал между этими процессами (~650 млн лет) коррелирует с длительностью суперконтинентальных циклов, начинающихся со стадии рифтогенеза и распада предшествующего суперконтинента до распада нового суперконтинента. Эти магматические события хорошо сопоставляются с этапами распада суперконтинентов Нуны и Родинии.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ (проект № 21-77-20018).

Литература

Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48. № 5. С. 32-53. doi: 10.7868/S0016853X1405004X

Лиханов И.И., Зиновьев С.В., Козлов П.С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. Т. 55. № 1. С. 41-65. doi: 10.1134/S0016852121010076

Ножкин А. Д., Туркина О. М., Лиханов И. И., Дмитриева Н. В. Позднепалеопротерозойские вулканические ассоциации на юго-западе Сибирского кратона (Ангаро-Канский блок) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 2. С. 312-332. doi: 10.15372/GiG20160203

Ernst R. E., Hamilton M. A., Soderlund U., Hanes J. A., Gladkochub D. P., Okrugin A. V., Kolotilina T., Mekhonoshin A. S., Bleeker W., LeCheminant A. N., Buchan K. L., Chamberlain K. R., Didenko A. M. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. V. 9. P. 464-469. doi: 10.1038/NGE02700

Evans D. A. D., Mitchell R. N. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic–Mesoproterozoic supercontinent Nuna // Geology. 2011. V. 39. P. 443–446. doi: 10.1130/G31654.1

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // Precambrian Research. 2017. V. 300. P. 315-331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research, 2019, v. 328, p. 128-145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia // Journal of Metamorphic Geology. 2004. V. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Régnier J. - L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // Lithos. 2018. V. 304-307. P. 468-488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

Torsvik T. H. The Rodinia Jigsaw Puzzle // Science. 2003. V. 300. P. 1379-1381.



УДК 551.72;551.24.056

**НОВЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ГРЕНВИЛЬСКИХ И ВАЛЬГАЛЬСКИХ
ТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА НА
ПРИМЕРЕ ГАРЕВСКОГО МЕТАКОМПЛЕКСА ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА**

И. И. Лиханов

Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия, likh@igm.nsc.ru

По результатам минералого-петрологических, геохимических и изотопно-геохронологических исследований получены данные по особенностям петрогенезиса, геотектоническим обстановкам и условиям формирования, возрастам метаморфизма и протолита контрастных по составу пород гаревского метаморфического комплекса. Установлены два импульса неопротерозойской эндогенной активности на западной окраине Сибирского кратона, связанные со становлением суперконтинента Родиния (930-900 и 880-845 млн лет), коррелирующие с гренвильскими и постгренвильскими коллизионно-аккреционными процессами вальгальской складчатости.

Ключевые слова: геохимия, тектонические обстановки, U-Pb и ^{40}Ar - ^{39}Ar возраст, Lu-Hf изотопная систематика цирконов, Енисейский кряж

**NEW EVIDENCE FOR GRENVILLE AND VALHALLA
TECTONIC EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF SIBERIAN CRATON:
THE EXAMPLE OF THE GAREVKA METACOMPLEX, YENISEY RIDGE**

I. I. Likhanov

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB of the RAS, Novosibirsk, Russia

We report new data on the petrogenesis, tectonic settings, thermodynamic conditions, metamorphism and protolith ages for compositionally contrasting rocks of the Garevka metamorphic complex, obtained from the results of mineralogical-petrological, geochemical, and isotope-geochronological studies. Zircon SHRIMP U-Pb analyses coupled with ^{40}Ar - ^{39}Ar dating constrain the timing of two new pulses of Neoproterozoic endogenous activity at the western margin of the Siberian Craton, associated with Grenville (930–900 Ma) and (880–845 Ma) post-Grenville Valhalla (880–845 Ma) accretion-and-collision processes.

Keywords: geochemistry, tectonic settings, U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating, Lu-Hf zircon isotope systematics, Yenisey Ridge.

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, представляющего собой коллизионно-аккреционный ороген на западной окраине Сибирского кратона, важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов, но и для верификации данных палеомагнитного моделирования о конфигурации Родинии. Этот суперконтинент возник на рубеже мезо-неопротерозоя в результате гренвильского орогенеза, фиксировавшего закрытие позднемезопротерозойского океана: его заключительные деформации имели возраст 1.2-0.9 млрд лет [Богданова и др., 2009]. Ключевым для палеоконтинентальных реконструкций неопротерозойского этапа эволюции Родинии также является вальгальский ороген [Cawood et al., 2010], сформировавшийся в диапазоне гренвильского и постгренвильского циклов, включающих эпохи Ренланд (980-910 млн лет) и Нордатыян (880-720 млн лет).

С другой стороны, на основании имеющихся в литературе представлений о низкой эндогенной активности в геологической эволюции Земли в интервале между 1.8 и 0.75 млрд лет, известных как скучный миллиард (boring billion), в ряде работ сделан вывод об отсутствии на Енисейском кряже гренвильских коллизионных

событий (например, [Верниковская, Верниковский, 2006]). Это привело к противоречивой трактовке ключевых вопросов геологической эволюции региона.

Мы считаем, что проблемы оценки геохронологических рубежей в истории суперконтинента Родиния во многом далеки от окончательного решения. Это связано с дефицитом геохимических данных и возрастных датировок, включающих периоды его становления и распада, что ограничивает возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли [Лиханов и др., 2014].

Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящей статье, где приведены геохронологические доказательства раннепротерозойских событий в эволюции докембрийских комплексов Енисейского кряжа. Такие исследования важны не только для понимания процессов, сформировавших тектонический облик региона, но и для решения широко дискутируемого вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древнего суперконтинента Родиния.

Наименее изученной является северо-западная часть Енисейского кряжа, сложенная древнейшими в Заангарье породами гаревского метаморфического комплекса (ГМК). Эти интенсивно метаморфизованные толщи, расположенные в пределах Приенисейской региональной сдвиговой зоны, составляют инфраструктуру (наиболее глубинные уровни) коллизионной системы [Likhanov et al., 2018]. В строении этого комплекса принимают участие серые биотитовые плагиогнейсы немтихинской толщи, которые выше по разрезу сменяются порфиробластическими плагиогнейсами, кристаллическими сланцами и гнейсами с широким развитием лейкогранитов, пегматитов, рапакиви- и адакитоподобных гранитов, мигматитов, амфиболитов и метатерригенно-карбонатных пород (кварцитов, кальцифиров, мраморов) малогаревской толщи [Likhanov et al., 2004].

В развитии этого комплекса были выделены три этапа [Likhanov et al., 2015]. На первом этапе сформировались зональные комплексы низких давлений And-Sil типа гренвильского возраста при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте $dT/dH=25-35^{\circ}\text{C}/\text{км}$ [Likhanov et al., 2019]. На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому (~800 млн лет) коллизионному метаморфизму умеренных давлений Ку-Sil типа с низким $dT/dH\leq 12^{\circ}\text{C}/\text{км}$ [Likhanov, Santosh, 2020]. Заключительные стадии развития коллизионного орогена в регионе маркируются дайковыми роями бимодального пояса, представленного анорогенными гранитоидами и внутриплитными базитами рифтогенной природы с возрастными внедрения 797–792 млн лет, фиксирующими начало распада Родинии [Likhanov, Santosh, 2017, 2019].

В рамках настоящих исследований были получены новые геологические, геохимические и изотопно-геохронологические данные по петрогенезису, геотектоническим обстановкам формирования, термодинамическим условиям, возрастам метаморфизма и протолита для контрастных по составу пород ГМК – порфиробластических гранитогнейсов, микроклин-цоизитовых ортоамфиболитов, рапакиви- и адакитоподобных гранитов, плагиогранитогнейсов, мигматитов и ортоклазовых лейкогранитогнейсов. Обсуждены возможные модели и геодинамические обстановки их формирования.

Установлены два новых импульса неопротерозойской эндогенной и тектонической активности на западной окраине Сибирского кратона (930-900 и 880-845 млн лет), коррелирующие с гренвильскими и постгренвильскими ранними коллизионно-аккреционными процессами вальгальской складчатости, с которыми связано становление суперконтинента Родиния.

Синхронность магматической и деформационно-метаморфической активности, а также схожая последовательность однотипных тектоно-термальных событий на арктической окраине Родинии, подтверждают территориальную близость Сибири и кратонов северной Атлантики (Лаврентии и Балтики) в диапазоне времени (0.93-0.85 млрд лет), что согласуется с современными палеомагнитными реконструкциями положения суперконтинентов. Новые доказательства гренвильских коллизионных событий в комплексе с другими возрастными эквивалентами в пределах западной окраины Сибирского кратона и палеоконтинентальными



реконструкциями позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии региона, например предположения об отсутствии на Енисейском крыже гренвилльских коллизионных событий.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена за счет средств гранта РНФ (проект № 21-77-20018).

Литература

- Богданова С.В., Писаревский С.А., Ли Ч.Х.* Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2009. Т. 17. № 3. С. 29-45. doi: 10.1134/S0869593809030022
- Верниковский В.А., Верниковская А.Е.* Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского крыжа // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. С. 35-52.
- Луханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С.* Гренвилльские тектонические события и эволюция Енисейского крыжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48. № 5. С. 32-53. doi: 10.7868/S0016853X1405004X
- Cawood P.A., Strachan R., Cutts K., Kinny P.D., Hand M., Pisarevsky S.* Neoproterozoic orogeny along the margin of Rodinia: Valhalla orogen, North Atlantic // *Geology*. 2010. V. 38. P. 99-102.
- Likhanov I.I.* Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. In: *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts*. Geol. Society, London, Special Publications. 2019. V. 478. P. 89-115. doi: 10.1144/SP478.11
- Likhanov I. I., Santosh M.* Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // *Precambrian Research*. 2017. V. 300. P. 315-331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019
- Likhanov I. I., Santosh M.* A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // *Precambrian Research*. 2019. V. 328. P. 128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018
- Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I.* Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia // *Journal of Metamorphic Geology*. 2004. V. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x
- Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P.* P-T-t constraints on polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 113. P. 391-410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026
- Likhanov I. I., Régnier J. - L., Santosh M.* Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // *Lithos*. 2018. V. 304-307. P. 468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

УДК 55 (084.3)

**БЕЛОМОРСКИЙ ПОДВИЖНЫЙ ПОЯС В СОСТАВЕ СУПЕРКОНТИНЕНТА
НУНА/КОЛУМБИЯ: НОВЫЕ ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

Н.В. Лубнина¹, А.И. Слабунов², А.В. Степанова², Н.С. Нестерова²

¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, natalia.lubnina@gmail.com

²Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Анализ истории формирования Беломорского подвижного пояса (БПП) позволял предполагать, что метаморфические преобразования габброидов сопровождалось их перемагничиванием, а латеральные вариации компонент намагниченности могут нести информацию о временной последовательности вывода в верхние уровни коры западного форланда Лапландско-Кольского орогена (ЛКО). Становление последнего происходило в период сборки суперконтинента Нуна/Колумбия. В результате комплексных исследований метаморфизованных палеопротерозойских магматических комплексов документально установлен закономерный тренд перемагничивания в породах БПП. Показано, что фронт перемагничивания распространялся здесь с северо-запада на юго-восток и он, вероятно, связан с особенностями коллизионных процессов при формировании ЛКО. Кроме того, в южной части БПП и ЮВ Карельского кратона установлено перемагничивание, возраст которого оценивается в 1.65-1.60 млрд лет, и связанное, вероятно, с завершающими эпизодами становления Свеккофеннского орогена.

Ключевые слова: Беломорский подвижный пояс, палеопротерозой, суперконтинент, Нуна/Колумбия, палеомагнетизм, геодинамические реконструкции, перемагничивание

**BELOMORIAN MOBILE BELT AS PART OF THE NUNA/COLUMBIA SUPERCONTINENT: NEW
PALEOMAGNETIC AND GEOLOGICAL DATA**

N.V. Lubnina¹, A.I. Slabunov², A.V. Stepanova², N.S. Nesterova²

¹*M.V.Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, Moscow, Russia*

²*Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia*

Analysis of the evolution of the Belomorian Mobile Belt (BMB) suggests that the metamorphism of gabbroic rocks was accompanied by their remagnetization and that lateral variations in magnetization constituents carry evidence for the time sequence of the extension of the western foreland of the Lapland-Kola orogen (LKO) to upper crustal levels. The latter formed while the Nuna/Columbia Supercontinent was being made up. The combined study of metamorphosed Paleoproterozoic igneous complexes has revealed a remagnetization trend in BMB rocks. The study has shown that the remagnetization front spread here from the north-west to the south-east and that it seems to be due to the collision pattern upon LKO formation. In addition, remagnetization in the southern BMB and in the southeastern Karelian Craton, dated at 1.65-1.60 Ga, was revealed. It seems to be due to the final episodes of formation of the Svecofennian orogen.

Keywords: Belomorian Mobile Belt, Paleoproterozoic, Supercontinent, Nuna/Columbia, paleomagnetism, geodynamic reconstructions, remagnetization

Беломорский подвижный пояс (БПП) Фенноскандинавского щита (Рис. 1) – крупная структура, расположенная между Карельским архейским кратоном и ядром палеопротерозойского Лапландско-Кольского коллизионного орогена [Ранний докембрий..., 2005; Слабунов, 2008]. В настоящее время многими исследователями БПП рассматривается как форланд Лапландско-Кольского орогена, а его тектоническая структура как суперпозиция неархейских и палеопротерозойских тектонических процессов [Ранний докембрий..., 2005; Слабунов и др., 2021].

БПП сложен главным образом мезо- и неоархейскими мигматизированными гранито-гнейсами, метавулканогенными и парагнейсовыми комплексами. Его отличительные черты – неоднократное проявление интенсивных деформаций и метаморфизма в обстановке повышенного и умеренного давления как в неоархее, так и в палеопротерозое [Слабунов, 2008 и ссылки в этой работе]. Граница БПП со смежными структурами окончательно сформировалась в палеопротерозое, а результаты датирования ультраметаморфических мигматитовых комплексов указывают на формирование ее в период 1,94–1,88 млрд лет [Слабунов и др., 2016].

Характерной особенностью БПП является широкое распространение в его пределах палеопротерозойских интрузивных образований, возраст которых варьирует от 2,50 до 2,12 млрд лет [Stepanova et al., 2021]. Среди палеопротерозойских интрузивных комплексов БПП установлены дайки и довольно крупные интрузивы (например, Ковдозерский, Кийостровский), но наиболее характерными и преобладающими являются небольшие фрагменты интрузивов. Их характерные особенности – линзовидная форма, тектонизированные контакты, рассланцованные пород эндоконтактной части, которое субсогласно с гнейсовидностью вмещающих пород.

Наиболее распространенными среди палеопротерозойских габброидов БПП являются дайки и малые интрузии комплекса лерцолитов–габброноритов [Степанов, 1981], время формирования которого оценивается в 2,43–2,39 млрд лет [Stepanova et al., 2021 и ссылки в этой работе]. Породы этого комплекса выделяются среди других палеопротерозойских интрузивных образований БПП, тем, что часто сохраняют реликты первичных магматических структур и минералов, а также фрагменты первичных магматических контактов с вмещающими породами. Вторая группа габброидов, широко распространенная в БПП, – высокожелезистые базиты (гранатовые или коронитовые метагаббро) [Степанов, 1981], возраст которых по единичным определениям оценивается в 2,12–2,18 млрд лет [Березин, Скублов, 2014; Stepanova, Stepanov, 2010]. Железистые базиты в БПП не сохраняют (или крайне редко сохраняют) реликты первичных минералов и сложены преимущественно метаморфическими клинопироксеном, плагиоклазом, амфиболом и гранатом, но в них часто диагностируются реликты магматических структур. Палеопротерозойские габброиды других возрастных групп распространены в БПП ограничено [Stepanova et al., 2021 и ссылки в этой работе].

Степень метаморфических преобразований в палеопротерозойских габброидов БПП варьирует от эклогитовой [Березин и др., 2012; Слабунов и др., 2011] до умеренно–барической амфиболитовой фации [Ранний докембрий..., 2005]. Установлена зональность степени их преобразований [Степанов, 1981]: эклогитизированные базиты установлены только в восточной и северо-восточной части БПП (район с. Гридино, Керетский архипелаг, Салмы), а вблизи границы с Карельским кратоном породы часто сохраняют реликты первичных минералов и метаморфические преобразования в них выражены в формировании тонких реакционных кайм граната и амфибола. Метаморфические преобразования габброидов обусловили, как предполагалось, их перемагничивание, а латеральные вариации компонент намагниченности являются отражением временной последовательности вывода в верхние уровни коры западного форланда Лапландско-Кольского орогена. Становление последнего происходило в период сборки суперконтинента Нуна/Колумбия (Рис. 1, врезка).

Для определения пространственного распределения вторичных компонент намагниченности были изучены объекты вдоль траверса Апатиты – Петрозаводск, который пересекает БПП с северо-востока на юго-запад под острым углом и в южном Беломорье на островах Онежской губы Белого моря между г. Беломорском на севере и г. Онега на юге. Объекты южного Беломорья, максимально удаленные от северной части Лапландско-Кольского орогена, расположены вблизи его предполагаемого юго-восточного продолжения [Самсонов и др., 2011]. Отдельное внимание было уделено изучению эклогитизированных базитов в районе с. Гридино, где установлено несколько возрастных генераций эклогитов, различающихся как по времени формирования эклогитовых парагенезисов (архейских и палеопротерозойских так и по составу и возрасту протолитов [Володичев и др., 2004; Слабунов и др., 2011, 2021; Максимов и др., 2022]).

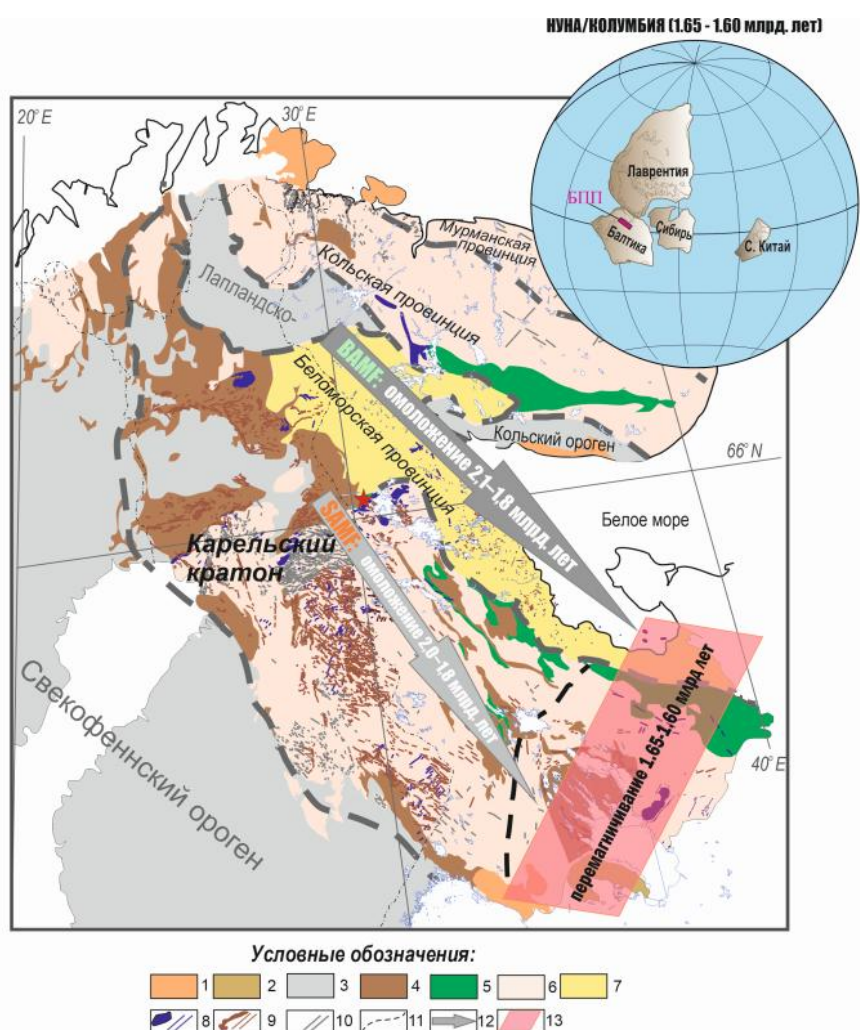


Рис. 1. Палеопротерозойское перемагничивание в породах БПП и Карельского кратона Фенноскандинавского щита. На врезке: реконструкция суперконтинента Нуна/Колумбия (1.65-1.60 млрд лет) и расположение БПП. Условные обозначения: 1 - осадочные комплексы и граниты рапакиви, 1,58-1,48 млрд лет; 2 - вулканогенно-осадочные комплексы 1,80-1,66 млрд лет; 3 - Лапландско-Кольский и Svecofennian орогены, 1,8-2,0 млрд лет; 4 - вулканогенно-осадочные комплексы, 2,3-1,8 млрд лет; 5 - вулканогенно-осадочные комплексы, 2,5-2,3 млрд лет; 6 - вулканогенно-осадочные комплексы, и магматические породы > 2,5 млрд лет; 7 - архейские комплексы Беломорского подвижного пояса; 8 - основные интрузивные породы 2,5-2,3 млрд лет; 9 - основные магматические породы 2,3-1,98 млрд лет; 10 - нерасчлененные мафические дайки > 1,98 млрд лет; 11 - границы террейнов Карельского кратона; 12 - тренды палеопротерозойского перемагничивания: в БПП (BAMF) и сопряженной части Карельского кратона (SAMF); 13 - перемагничивание 1.65-1.60 млрд лет.

Fig 1. Paleoproterozoic remagnetization in the BMB and Karelian Craton rocks of the Fennoscandian Shield. Inset: reconstruction of the 1.65-1.60 Ga Nuna/Columbia Supercontinent and BMB's location. Legend: 1 – 1.58-1.48 Ga sedimentary complexes; 2 - 1.80-1.66 Ga volcanic-sedimentary complexes; 3 – 1.8-2.0 Ga Lapland-Kola and Svecofennian orogens; 4 – 2.3-1.8 Ga volcanic-sedimentary complexes; 5 - вулканогенно-осадочные комплексы, 2,5-2,3 Ga volcanic-sedimentary complexes; 6 - > 2.5 Ga volcanic-sedimentary complexes and igneous rocks; 7 – Archean complexes of the Belomorian Mobile Belt; 8 – 2.5-2.3 Ga mafic intrusive rocks; 9 – 2.3-1.98 Ga mafic igneous rocks; 10 - > 1.98 Ga undivided mafic dikes; 11 – Karelian Craton terrain boundaries; 12 – Paleoproterozoic remagnetization trends: in BMB (BAMF) and in the conjugate portion of the Karelian Craton (SAMF); 13 - 1.65-1.60 Ga remagnetization

В результате комплексных исследований палеопротерозойских магматических комплексов установлен закономерный тренд перемагничивания [Lubnina et al., 2015, 2016]. Показано, что фронт перемагничивания распространялся с северо-запада на юго-восток, что хорошо согласуется с результатами изотопного датирования этих же комплексов (Рис. 1). Полученный тренд перемагничивания, возможно, отражает особенности выведения в верхние части земной коры пород форланда Лапранско-Кольского коллизийного орогена [Ранний докембрий...2005] в ходе палеопротерозойской коллизии (рис. 1). Кроме того, в южной части БПП и ЮВ Карельского кратона установлено перемагничивание возраст которого оценивается в 1.65-1.60 млрд лет (Рис. 1) связанное, вероятно, с завершающими эпизодами становления Свекофеннского орогена

Установлена зависимость процессов перемагничивания от состава пород [Lubnina et al., 2016; Lubnina, Tarasov, 2019]. Степень сохранности вторичных ранних и поздних компонент намагниченности, возможно, связана не только с составом протолитов, но и с различными условиями преобразований пород, в том числе их флюидонасыщенностью.

Литература

Березин А.В., Травин В.В., Марин Ю.Б., Скублов С.Г., Богомолов Е.С. Новые данные о возрасте (U-Pb, Sm-Nd) и Р-Т параметрах эклогитизации даек Fe-габбро района Гридино (Беломорский подвижный пояс) // Доклады АН, 2012, т. 444(6), с. 644 – 649.

Володичев О.И., Слабунов А.И., Бибикина Е.В., Конюхов А.Н., Кузнецов Т.И. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология, 2004, т. 12(6), с. 609 – 631

Максимов О.А., Балаганский В.В., Слабунов А.И., Ларионов А.Н. Два этапа высокобарного метаморфизма в раннедокембрийских эклогитах (район Гридино Беломорской провинции Фенноскандинавского щита): петрология и геохронология // Петрология. 2022. Т. 30, №2. С. 140-165

Ранний докембрий Балтийского щита. Глебовицкий В.А. (ред.). СПб.: Наука, 2005. 711 с.

Самсонов А.В., Третьяченко В.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О., Лепехина Е.Н., Ларионов А.Н., Ипатьева И.С. Фундамент Архангельской алмазносной провинции как Ю-В часть Лапландско-Кольского коллизийного орогена // Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли. Материалы научной конференции и путеводитель научных экскурсий. 2011. С. 196-198

Слабунов А.И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008, 298 с.

Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика, 2021, т. 62, № 5, с. 648—675 DOI: 10.15372/GiG2021116 (Slabunov, A.I., Balagansky, V.V., Shchipansky A.A. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the tectonic setting of eclogites // Russian Geology and Geophysics, 2021, vol. 62, No 5, pp. 525–546 doi:10.2113/RGG20204266)

Слабунов А.И., Азимов П.Я., Глебовицкий В.А., Жанг Л., Кевлич В.И. Архейская и палеопротерозойская мигматизации пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // Доклады АН, 2016, т. 467 (1), с. 71 – 74.

Слабунов А.И., Володичев О.И., Скублов С.Г., Березин А.В. Главные стадии формирования палеопротерозойских эклогитизированных габбро-норитов по результатам U-Pb (SHRIMP) датирования цирконов и изучения их генезиса // Доклады АН, 2011а, т. 437 (2), с. 238–242.

Степанов В.С. Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. Л.: Наука. 1981, 216 с.

Lubnina N.V., Slabunov A.I., Stepanova A.V., Bubnov A.Yu., Kosevich N.I., Novikova M.A., Tarasov N.A. The Paleoproterozoic Remagnetization Trend in Rocks of the Belomorian Mobile Belt: Paleomagnetic and Geologic Evidence // Moscow University Geology Bulletin, 2016. V. 71, № 5, P. 311–322.



Lubnina N.V., Tarasov N.A. A Paleomagnetic Study of Sariolian Conglomerates of the Onega Structure of the Karelian Protocraton: The Problem of Global Paleoproterozoic Remagnetization // *Moscow University Geology Bulletin*, 2019. V. 74, № 1. P. 15–26.

Lubnina, N.V., Zakharov, V.S., Novikova, M.A., and Vorontsova, V.P. Paleoproterozoic remagnetization in the White Sea mobile belt, Karelia: Petro-paleomagnetic evidence and supercomputer modeling // *Moscow University Geology Bulletin*, 2015. V 70. № 2. P. 84–96. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0145875215020052>

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 // *Geological Society, London*, Spec. Publ. 2021a. V. 518. <https://doi.org/10.1144/SP518-2021-30>

Stepanova A., Stepanov V. Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield // *Precambrian Research*, 2010, v.183(3), p. 602 – 616.



УДК 552.48+551.2(470.22)

**Р-Т-t ТРЕНДЫ МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ЭКЛОГИТОВ ГРИДИНСКОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ
(ОСТРОВ СТОЛБИХА И УЧАСТОК САМЫЛИНО)**

О.А. Максимов

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, olemaximov@mail.ru

В ходе изучения эклогитов Гридинского комплекса Беломорской провинции установлена сложная история их метаморфического преобразования. Полиметаморфизм этих пород фиксируется по реликтам ранних и поздних высокобарных парагенезисов (омфациит+гранат), реакционным микроструктурам, изменению химической зональности граната, термобарометрическим расчетам и изотопно-геохронологическим исследованиям. Эти данные свидетельствуют о проявлении двух этапов эклогитового метаморфизма в Гридинском комплексе – в архее и палеопротерозое. В результате исследования получены два Р-Т-t тренда регрессивной стадии эволюции пород с последовательным переходом от эклогитовой фации к гранулитовой (амфиболитовой). Вблизи пика метаморфизма первого тренда формируются метаморфогенные цирконы с возрастом 2,7 млрд лет, а второго – 1,9 млрд лет.

Ключевые слова: Р-Т-t тренд, метаморфизм, эклогит, архей, Беломорская провинция.

**P-T-t TRENDS OF METAMORPHIC TRANSFORMATION OF ECLOGITES IN THE GRIDINO
COMPLEX OF THE BELOMORIAN PROVINCE (BY THE EXAMPLE OF THE SAMYLINO SITE)**

O.A. Maksimov

Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia

Eclogites in the Gridino complex of the Belomorian province have complex history of metamorphic transformations. Their polymetamorphism is revealed from relics of early and late high-pressure mineral assemblages (omphacite+garnet), reaction microstructures, changes of the garnet chemical zoning, results of thermobarometric calculations, and isotope-geochronological studies. Geochronological data indicate two stages of eclogitic metamorphism in the Gridino complex at the Archean and Paleoproterozoic. As a result of the study, we obtained two P-T-t trends for the regressive stage of rock evolution with a successive transition from eclogitic facies to granulite (amphibolite). The peak of the first metamorphic event responds to metamorphic zircons with an age of 2,7 Ga. The maximal values of the P-T conditions of the second metamorphic event are reliably correlated with 1,9 Ga metamorphic zircons.

Key words: P-T-t trend, metamorphism, eclogite, Archean, Belomorian province.

В Беломорской провинции Фенноскандинавского щита установлены раннедокембрийские эклогиты и продукты их ретроградного преобразования [Володичев и др., 2004; Mints et al., 2010]. Они входят в состав меланжей, типичным примером которых является Гридинский эклогитсодержащий комплекс, состоящий из мигматизированных ТТГ гнейсов и будинированных тел различного состава. Особенностью этих пород является сложная история метаморфических изменений, связанная с беломорской (2,72–2,66 млрд лет) и лапландско-кольской (1,94–1,90 млрд лет) коллизионными орогенениями [Слабунов и др., 2021, ссылки в работе].

Эклогиты являются важным источником информации о полиметаморфизме Гридинского комплекса, в связи с их особенностями текстуры, микроструктуры и минерального состава. Наиболее изученные в настоящее время будинированные тела эклогитов находятся на острове Столбиха [Володичев и др., 2004; Слабунов и др., 2021 ссылки в работе] и участке Самылино [Максимов и др., 2022]. Эти будины характеризуются ярко выраженным неоднородным внутренним строением, сформированным в результате неоднократно проявленных

тектоно-метаморфических процессов. Неоднородность выражается в изменении характера деформаций, текстур пород и смене метаморфических минеральных парагенезисов. Жилы гранитного состава с возрастом около 2,68 и 1,88 млрд лет формируются на завершающей стадии коллизионных орогений.

На основе петрологических и геохронологических исследований эклогитов установлены два этапа высокобарного метаморфизма: ранний – архейский с образованием эклогитов-I и поздний – палеопротерозойский с формированием эклогитов-II [Слабунов и др., 2021; Volodichev et al., 2021; Максимов и др., 2022].

Эклогиты-I установлены по включениям Omp, Rt и Qz (сокращения минералов по [Whitney, Evans, 2010]) в центральной части зерен граната и парагенетичным зернам метаморфического циркона с Grt-Omp включениями и возрастом около 2,7 млрд лет [Володичев и др., 2004; Volodichev et al., 2021]. Результаты термобарометрических расчетов указывают на их формирование при $T = 750^{\circ}\text{C}$ и $P = 14$ кбар. Поздние изменения эклогитов-I связаны с формированием Grt-Cpx-Hbl-Bt-Pl-Qz минеральной ассоциации при снижении давления до 11 кбар и увеличении температуры до 900°C в ходе декомпрессионного ретроградного изменения в условиях высокобарной гранулитовой фации.

Эклогиты-II на острове Столбиха и участке Самылино образуются по эклогитам-I, что подтверждается присутствием ранних включений Di-Pl симплектитов в монокристаллах омфацита и центральной части граната, а также наличием двух генераций метаморфических цирконов 2,7 и 1,9 млрд лет [Volodichev et al., 2021]. Оценить P-T условия метаморфизма данного этапа возможно только по включениям Di+Pl+Hbl (+Qz) в гранатах Самылино $T = 700\text{--}760^{\circ}\text{C}$ и $P = 12\text{--}14,5$ кбар.

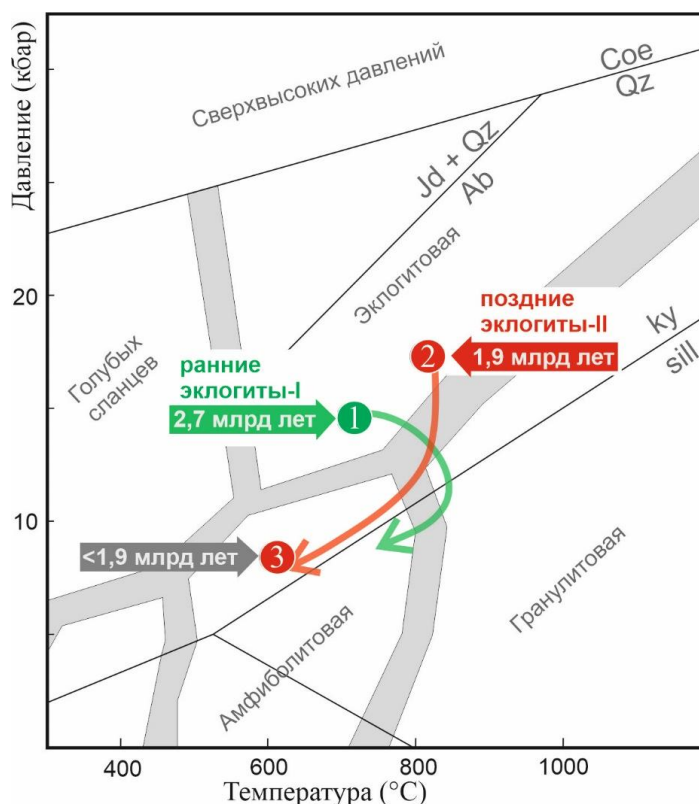


Рис. 1. P-T-t метаморфические тренды преобразования эклогитов Гридинского комплекса (зеленый – эклогитов-I, красный – эклогиты-II) на P-T диаграмме.

Fig. 1. P-T-t metamorphic transformation trends of eclogites of the Gridino complex (green – eclogites-I, red – eclogites-II) on the P-T diagram.

Поздняя генерация Grt+Omp минерального парагенезиса и включений Omp в промежуточной части граната в эклогитах-II образовалась при $T = 700\text{--}800^\circ\text{C}$ и $P = 14\text{--}17$ кбар. Этому этапу метаморфизма соответствует циркон с возрастом 1,9 млрд лет, содержащий включения граната и омфацита [Yu et al., 2017].

Последующие стадии метаморфизма связаны с ретроградными изменениями эклогитов в условиях высокобарной гранулитовой ($T = 750\text{--}850^\circ\text{C}$, $P = 12\text{--}15$ кбар) и амфиболитовой ($T = 600\text{--}650^\circ\text{C}$, $P = 8\text{--}11$ кбар) фаций.

В результате термобарометрических расчетов и их сопоставления с данными U-Th-Pb датирования цирконов был получен сложный P-T-t тренд метаморфических преобразований эклогитов Столбихи и Самылино (рис.). Он состоит из двух ретроградных ветвей для эклогитов-I и эклогитов-II, которые отражают декомпрессионные изменения пород в условиях высокобарной гранулитовой и амфиболитовой фации. Тренды характеризуются движением по часовой стрелке, что типично для орогенного (коллизийного) и субдукционного метаморфизма [Лиханов, 2020].

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГ КарНЦ РАН АААА-А18-118020290085-4.

Литература

Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикина Е. В., Конилов А. Н., Кузенко Т. И. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология, 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631.

Лиханов И.И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология, 2020. Т. 28, №1. С. 4–22.

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

Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика, 2021. Т. 62, № 5. С. 648–675. doi: 10.15372/GiG2021116

Mints M.V., Belousova E.A., Konilov A.N., Natapov L.M., Shchipansky A.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Dokukina K.A., Kaulina T.V. Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia // Geol. 2010. V. 38. P. 739–742.

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. <https://doi.org/10.3390/min11101029>

Whitney D.L. and Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // Amer. Mineral. 2010. V. 95. P. 185–187.

Yu H. L., Zhang L. F., Wei C. J., Li X. L., Guo J. H. Age and P-T Conditions of the Gridino eclogite in the Belomorian Province, Russia // J. Metamorp. Geol. 2017. V. 35. P. 855–869. doi.org/10.1111/jmg.12258



ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ ФОРМАЦИИ ДОКЕМБРИЯ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

П.В. Медведев

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, pmedved@krc.karelia.ru

Древние железорудные образования - богатые железом и кремнеземом хемогенные осадочные породы докембрийского возраста содержат информацию о экологических условиях в архейском (4,0–2,5 млрд лет назад) и протерозойском (2,5–0,539 млрд лет назад) эонах. Несмотря на разногласия относительно механизмов их образования, железорудные формации являются свидетельством влияния докембрийской биосферы на химический состав древнего океана. Поскольку многие железорудные образования представляют собой хемогенные отложения, отражающие состав вод, из которых они выпали в осадок, они также могут служить подробными геохимическими архивами для изучения температуры древних морей, окислительно-восстановительных состояний и круговорота химических элементов.

Ключевые слова: архей, протерозой, железорудные формации, условия образования, микроорганизмы

PRECAMBRIAN IRON FORMATIONS: PALEOECOLOGICAL AND PALEONTOLOGICAL ASPECTS

P.V. Medvedev

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

Ancient iron formations - chemogenic sedimentary rocks rich in iron and silica of Precambrian age contain information about environmental conditions in the Archean (4.0–2.5 Ga) and Proterozoic (2.5–0.539 Ga) eons. Despite disagreements about the mechanisms of their formation, iron formations are evidence of the influence of the Precambrian biosphere on the chemical composition of the ancient ocean. Since many iron ore formations are chemogenic deposits reflecting the composition of the waters from which they precipitated, they can also serve as detailed geochemical archives for studying the temperature of ancient seas, redox states and the cycle of chemical elements.

Key words: Archean, Proterozoic, Iron formations, Depositional environments, microorganisms

Железорудные формации (ЖФ) представляют собой богатый железом тип горных пород, который характерен для многих архейских и протерозойских супракрустальных толщ и является химическим архивом состава докембрийской морской воды и круговорота железа после осаждения. Учитывая, что они накапливались на морском дне в течение более двух миллиардов лет ранней истории Земли, изменения в их химическом, минералогическом и изотопном составе дают уникальный взгляд на изменения окружающей среды, которые произошли на эволюционирующей Земле. Возможно, один из наиболее значимых событий стал переход от бескислородной планеты к планете, где кислород постоянно присутствовал в толще морской воды и атмосфере. С этим постепенным глобальным насыщением кислородом была связана эволюция аэробного микробного метаболизма, который фундаментально повлиял на процессы континентального выветривания, поступление питательных веществ в океаны и, в конечном счете, диверсификацию биосферы и возникновению сложных форм жизни. Многие из ключевых современных открытий в понимании генезиса ЖФ связаны с геобиологией, поскольку биологически поддерживаемое окисление двухвалентного железа (Fe^{2+}), либо напрямую посредством фотоферротрофии, либо косвенно посредством кислородного фотосинтеза, обеспечивает процесс осаждения ЖФ. Обилие и изотопный состав минералов, содержащих Fe^{2+} , в ЖФ предполагают ещё и микробное восстановление трёхвалентного железа (Fe^{3+}) археями и бактериями. Связи между геобиологией, гидротермальными системами и образованием ЖФ традиционно игнорировались, но теперь формируют согласованную модель для этого уникального типа горных пород [Mänd et al., 2022].

ЖФ это богатые железом (15-40 мас.% Fe) и кремнистые (40-60 мас.% SiO₂) хемогенные осадочные породы, которые выпадали в осадок из морской воды на протяжении докембрийского времени в интервале между 2,80 и 1,85 млрд лет назад (неоархей и палеопротерозой). На минимальное поступление детрита при отложении глубоководных ЖФ указывают низкие концентрации Al₂O₃ (<1 мас.%) и микроэлементов, которыми обогащены породы земной коры (Ti, Zr, Th, Hf и Sc <20 промилле) [Konhauser et al., 2017]. Большинство ЖФ демонстрируют характерную полосчатость переменной толщины, от макрополос (толщиной в метр) до мезополос (толщиной в сантиметр) и до микрополос (миллиметровой и субмиллиметровой толщины) по которым они обычно определяются как полосчатые железорудные формации (BIF). Микрополосы были связаны с эпизодическим гидротермальным воздействием, которое, как предполагалось ранее, представляет собой годовой процесс осаждения. Полосчатость в BIF может быть обширной по площади, указывающей на отложение ниже уровня волн. Некоторые ЖФ, известные как гранулированные железные формации (GIF) лишены этой характерной полосчатости. Они состоят из гранул кремнезема и оксидов или силикатов железа, с ранне диагенетическим кремнистым, карбонатным или гематитовым цементом, заполняющим поровое пространство [Bekker and Kovalick, 2021]. Обычно считается, что GIF осаждались вблизи берега на мелководье. ЖФ всех типов могут предоставить важную информацию о составе вод древних океанов, но только в том случае, если можно разделить их физическую и химическую среду отложения, тектоническую обстановку бассейна, первичные и вторичные сигналы.

ЖФ в широком смысле определяются как относящиеся либо к типу Альгомы, либо к типу Сьюперииор в зависимости от условий осаждения, хотя логичнее рассматривать эти типы как крайние члены, имеющие спектр промежуточных разновидностей [Bekker et al., 2014]. ЖФ типа Альгомы переслаиваются или стратиграфически и генетически связаны с подводными мафит-ультрамафитовыми и фельзитовыми вулканическими породами и связанными с ними вулканокластическими грауваками и сланцами в зеленокаменных поясах, а во многих случаях пространственно связаны с вулканогенными месторождениями массивных сульфидных руд [Bekker et al., 2014]. ЖФ типа Альгомы, по-видимому, образовались вблизи вулканических дуг и

центров спрединга в результате эксгаляционных гидротермальных процессов, связанных с подводным вулканизмом. Эти ЖФ содержат оксидную, силикатную и карбонатную фации и обычно классифицируются в сульфидные отложения, которые могут быть обогащены медью, цинком, свинцом, серебром и золотом. Отсутствие каких-либо седиментологических особенностей, кроме тонкой полосчатости (т.е. отсутствие осадочных текстур, генерируемых течением, приливом или волной) в ЖФ типа Альгома, указывает на глубоководную среду осадконакопления, вероятно, удаленную от континентальных массивов суши. В этом отношении ЖФ типа Альгома имеют составы, которые отражают влияние местных гидротермальных флюидов либо в частично закрытых бассейнах, либо в открытых системах морской воды [Konhauser et al., 2017]. ЖФ, которые выпали в осадок до 3,0 млрд лет назад, обычно описываются как альгомского типа, хотя есть также примеры, которые образовались 2,7-2,6 млрд лет, а также неальгомские, мелководноморские ЖФ толщи в палеоархее.

Напротив, ЖФ типа Сьюперииор развивались в условиях пассивной окраины с преобладанием осадконакопления (т.е. после образования стабильных континентальных шельфов) и, как правило, не имеют прямых стратиграфических связей с вулканическими породами. Считается, что эти ЖФ были отложены в прибрежных шельфовых средах, поскольку они обычно переслаиваются с карбонатами и черными сланцами. В отличие от большинства ЖФ типа Альгомы, которые редко протягиваются более чем на 10 км вдоль простирания и обычно имеют мощность не более 50 м, ЖФ типа Сьюперииор могут быть очень обширными по площади, первоначально превышая 100 000 км² [Bekker et al., 2014]. С точки зрения запасов, самые крупные ЖФ типа Сьюперииор содержат более 1014 тонн железа [Konhauser et al., 2017], обеспечивая большую часть железа, необходимого для мировой экономики. Эти ЖФ включают в себя хребет Хамерсли в Австралии,



Минас-Жерайс в Бразилии, Трансваальскую надсерию в Южной Африке, Кривой Роге в Украине и Лабрадорский трог в Канаде.

BIF доминируют в эоархейских и раннепалеопротерозойских последовательностях. Они состоят в основном из перемежающихся полос, богатых железом и кремнеземом, и, как правило, осаждались в относительно глубоководных условиях, поскольку в них обычно отсутствуют свидетельства воздействия волн или штормов. Большинство BIF обычно либо перекрываются, либо подстилаются богатыми органическим веществом и сульфидами сланцами, а в некоторых случаях переслаиваются с ними.

GIF впервые появляются в геологической летописи около 2,90 млрд лет назад [Konhauser et al., 2017], достигают своего пика около 1,88 млрд лет назад, а затем заменяются железняками в фанерозойской летописи (после 543 млн лет назад) [Bekker et al., 2014]. Они характеризуются гранулами, которые могут различаться по морфологии, размеру (от микрометров до сантиметров в диаметре) и составу (кремнезем, оксиды железа, карбонаты железа и/или силикаты железа); цемент обычно представляет собой кремнезем, карбонат или гематит. Многие из гранул рассматриваются как обломочные, причем некоторые из них получены в результате осадочной переработки богатых железом глин, аргиллитов, аренигов и даже строматолитов. Другие, такие как оолитовые породы свиты Тимболл Хилл в Южной Африке (2,32 млрд лет) состоят из концентрических корковых отложений гематита, которые, вероятно, осаждались там, где богатые Fe^{2+} воды встречались на малой глубине с более насыщенной кислородом морской водой. В породе могут преобладать как гранулы, так и цемент. Наличие осадочных текстур, образованных волнами и течением, а также косоугольной слоистости указывает на то, что гранулы были отложены у берега на глубине, близкой к основанию волн или выше него.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00026 по проекту: «Геодинамические обстановки ранней Земли и архейские полосчатые железистые кварциты» и темы НИР ИГ КарНЦ РАН № 208 «Общие закономерности развития тектоносферы и биосферы Земли в раннем докембрии (на примере Восточной Фенноскандии): анализ магматических, метаморфических систем, металлогении и ранней жизни»

Литература

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations // Alderton D., Elias, S. A., eds., Encyclopedia of Geology (2nd ed.), Oxford: Academic Press. 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5

Bekker A., Planavsky N. J., Krapež B. et al. Iron formations: Their origins and implications for ancient seawater chemistry // Holland H. D., Turekian K. K., eds., Treatise on Geochemistry (2nd ed.), Oxford: Elsevier. 2014. P. 561–628. doi:10.1016/B978-0-08-095975-7.00719-1

Konhauser K.O., Planavsky N.J., Hardisty D.S., et al. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history // Earth-Science Reviews. 2017. 172. P. 140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Mänd K., Robbins L., Planavsky N., Bekker A., Konhauser K. Iron Formations as Palaeoenvironmental Archives (Elements in Geochemical Tracers in Earth System Science). Cambridge: Cambridge University Press. 2022. 44 p. doi:10.1017/9781108993791

УДК 551.71/.72

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКАЯ СТРУКТУРА ВЕТРЕННЫЙ ПОЯС: НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ

С.В. Межеловская¹, А.Д. Межеловский².

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, mezhelsofya@gmail.com

²Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

В раннем протерозое на территории Балтийского щита в результате деструкции континентальной коры заложился рифт Ветренный пояс. Проведенные исследования его осадочно-вулканогенного комплекса позволили установить, что пояс сформировался на коре континентального типа в пределах Карельского кратона. Осадки и вулканиты формировались во внутриплитной прибрежно-морской обстановке. Реконструкция источников сноса для формирования обломочного материала указывает на континентальные условия на всем протяжении становления структуры. Однако сопоставление разреза Ветренного пояса с аналогичными прогибами Балтийского щита все еще позволяет усомниться в принятой стратиграфической последовательности.

Ключевые слова: Балтийский щит; петрографическое и изотопно-геохронологическое изучение, стратиграфия, корреляция.

PALEOPROTEROZOIC STRUCTURE OF THE WINDY BELT: UNRESOLVED ISSUES

S.V. Mezhelovskaya¹, A.D. Mezhelovskiy².

¹Geological Institute of the RAS, Moscow, Russia

²Russian State Geological Prospecting University Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russia

The Windy Belt rift was formed in the Baltic Shield in the Early Proterozoic as a result of the destruction of the continental crust. Investigations of its sedimentary-volcanogenic complex have shown that the belt was formed on the continental crust within the Karelian craton. Sediments and volcanics were formed in an intraplate coastal-marine environment. Reconstruction of the sedimentation sources for clastic formation indicates continental conditions all along the formation of the structure. However, comparison of the section of the Windy Belt with analogous depressions of the Baltic Shield still allows us to question the accepted stratigraphic sequence.

Keywords: Baltic Shield; petrographic and isotope-geochronological studies, stratigraphy, correlation.

Раннепротерозойская структура Ветренный пояс, расположенная на юго-востоке Карельского кратона, является пограничной между Беломорским подвижным поясом и Карельской гранит зеленокаменной областью. Пояс образован чередованием осадочных и вулканогенных толщ, преобразованных в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма и погружающихся под углами 20-40° в северо-восточном направлении. Долгое время разрез Ветренного пояса являлся аналогом других палеопротерозойских структур. По мнению ряда исследователей [Богданов и др., 2011] различные комплексы пояса были отнесены к сумийскому, ятулийскому и людиковийскому надгоризонтам палеопротерозоя в том числе и по данным Госгеолкарты [Государственная..., 2001]. Комплекс Ветренного пояса успешно коррелировался со стратотипическими разрезами, например, Онежской структуры, пока не были получены датировки по вулканитам, завершающим разрез Ветренного пояса. На сегодняшний день есть несколько изотопных датировок для коматиитовых базальтов, завершающих разрез Ветренного пояса: U-Pb (2405±5 млн лет) [Межеловская и др., 2016], Re-Os (2407±6 млн лет) [Puchtel et al., 2016] и Sm-Nd (2410±34 млн лет) [Puchtel et al., 1997]. Изучение осадочно-вулканогенного комплекса позволило вновь поставить под сомнение принятую стратиграфическую последовательность Ветренного пояса.

В основании разреза, на размытой поверхности архейских плагиогранитоидов залегает токшинская свита. Основу разреза составляют светло-серые, рассланцованные кварциты. Основными минералами является кварц - до 98%, в подчиненном количестве находятся мусковит, серицит, и фуксит. Мощность свиты достигает 1500м. Петрогеохимические данные позволяют сделать вывод о том, что породы свиты представляют собой продукты неоднократного цикла седиментации и накапливались в прибрежно-морской обстановке. Выше залегает вулканогенная киричская свита, граница с подстилающими образованиями проводится по появлению в разрезе первого горизонта лав андезибазальтового состава. В строении лавовых потоков встречаются миндалекаменные базальты, лавобрекчии, агломераты и туфы, иногда наблюдаются прослои туфоконгломератов. Основная масса представлена новообразованными амфиболами и измененными полевыми шпатами. Породы свиты слагают как обширные лавовые поля, так и формируют отдельные вулкано-тектонические структуры центрального типа. Мощность свиты 700-1100м. Породы калгачинской свиты представлены конгломератами, в составе обломков резко преобладают гранитоиды, цемент кварцево-слюдистый с хлоритом. Форма и размер галек меняется по разрезу: внизу обломки имеют уплощенную продолговатую форму (соотношение длины и ширины от 2 до 5, размер 2-3см); вверх по разрезу размер увеличивается до 7-10см а форма приближается к сферической (соотношение длины к ширине от 1,5 до 2). Такое обстоятельство может указывать на смену обстановки седиментации с континентальной (русловой) на прибрежно-морскую. Установленная мощность свиты не менее 100м. Выше залегает кожозерская свита, обладающая пестрым составом. Базальные пачки сложены чередованием песчаников и туффитов. Для средней части разреза типично переслаивание карбонатов, туффитов с потоками базальтов, трахибазальтов. В верхах разреза наблюдаются светлые и темные слоистые доломиты и аркозовые кварцитопесчаники. По зеленым сланцам развита биотитизация, в карбонатах присутствует терригенная примесь кварца и полевых шпатов. В аркозовых кварцитопесчаниках развиты кварц, полевые шпаты, серицит, микроклин и эпидот. Наличие хорошо сохранившихся неокатанных минералов, а иногда и мелких обломков пород кислого состава указывают на низкую степень зрелости пород и близко расположенный источник сноса. Мощность свиты колеблется от 400 до 600м. Виленгская свита в нижней части разреза сложена темно-серыми песчаниками, алевролитами и пелитами с прослоями туффитов. Темный цвет пород обусловлен преобладанием темноцветных минералов (преобладает пироксен), а в ряде случаев, присутствием углеродистого вещества. В верхней части разреза появляются олигомиктовые кварцитопесчаники основными минералами в них являются кварц, серицит и полевые шпаты. Мощность 1200-1500м. Завершает разрез свита ветреного пояса, сложенная многочисленными потоками коматиитовых базальтов и туфов. Потоки часто дифференцированы и подразделяются на кумулятивные зоны, а также зоны с микроструктурой спинифекс оливинового или пироксенового типов. В обнажениях часто наблюдаются миндалекаменные базальты, лавобрекчии и подушечные лавы. Мощность свиты по геофизическим данным достигает 4000м.

На гистограммах распределения возрастов детритовых цирконов с графиками плотности вероятности для всех осадочных уровней Ветреного пояса наблюдаются палео- мезо- и неоархейские пики 2,7- 2,8- 2,9 млрд лет, которые отвечают времени становления основных структурно-вещественных комплексов Карельской гранит-зеленокаменной области. Самые древние зерна имеют возраст 3,1-3,3 млрд лет, а самые молодые в кожозерской и виленгской свите 2464-2494 млн лет и фиксируют нижний предел осадконакопления. На основе комплексного изучения циркона были реконструированы возможные источники сноса при формировании осадков Ветреного пояса. Ими были различные вещественные комплексы Сумозерско-Кенозерского пояса, гранитоиды Шилосского типа, ТТГ комплексы Водлозерского блока и поздние гранитоиды Каменноозерской структуры. Процесс накопления осадочных толщ Ветреного пояса происходил в спокойной мелководной прибрежно-морской обстановке в континентальных условиях, что подтверждается геохимическими данными.



Таким образом, сводный разрез Ветреного пояса отличается от сумийских прогибов Балтийского щита присутствием в середине разреза карбонатов с прослоями высокомагнезиальных базальтов, трахибазальтов и углеродсодержащих осадков, а также полным отсутствием кислых производных вулканизма. В то же время, многие особенности последовательности и состава пород разреза Ветреного пояса сближают его с более молодыми, ятулийским и людиковийским, надгоризонтами палеопротерозойских структур на Карельском кратоне. Выяснение причин такой специфики Ветреного пояса требует дополнительных исследований.

Литература

Богданов Ю.Б., Робонен В.И. Результаты деятельности региональной межведомственной стратиграфической комиссии по северо-западу России (1984– 2010) // Геология Карелии от архея до наших дней. ИГ КарНЦ РАН. ВСЕГЕИ, 2011. С. 65.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Сер. Карельская. Листы Р-37-I, Р-37-VII. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2001. 94 с. +1 вкл. (МПР РФ, ПГО «Архангельскгеология»).

Межеловская С. В., Корсаков А. К., Межеловский А. Д., Бибилова Е. В. Временной диапазон формирования осадочно-вулканогенного комплекса Ветреного пояса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2016. Т. 24. № 2. С. 1–14.

Puchtel I. S. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetreny Belt, southeastern Baltic Shield Evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere / I. S. Puchtel, K.M. Haase, A.W.Hofmann et al. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1997 vol. 61, – P. 1205–1222.

Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R. J., Brandon A. D., Nicklas R. W., Kulikov V. S., Samsonov A. V. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean–Proterozoic boundary: Evidence from 2.4 Ga komatiites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 180 (May 2016): 227–255.

УДК 551.71:552.313+550.4:551.2(470.22)

**КИЧАНСКАЯ ОСТРОВОДУЖНАЯ СИСТЕМА АРХЕЯ (НОВЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И
ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА)**

Т.А. Мыскова¹, А.С. Никонова², К.А. Никонов², И.А. Житникова², П.А. Львов^{1,2}

¹Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, myskova@gmail.com

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

Предложена обновленная схема стратификации зеленокаменных образований Кичанской структуры. Определены возрасты (U-Pb по циркону) кристаллизации и метаморфизма вулканитов. Установлена последовательность формирования выделенных толщ и продолжительность геодинамических режимов.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; архей; U-Pb возраст; геодинамические обстановки.

**THE KICHAN ISLAND-ARC ARCHAEN SYSTEM (NEW GEOCHEMICAL AND ISOTOPE-
GEOCHRONOLOGICAL EVIDENCE)**

T.A. Myskova¹, A.S. Nikonova², K.A. Nikonov², I.A. Zhitnikova², P.A. Lvov^{1,2}

¹Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

²A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

An updated scheme of stratification of greenstone formations of the Kichanskaya structure is proposed. The ages (U-Pb according to zircon) of crystallization and metamorphism of volcanic rocks have been determined. The sequence of formation of the identified strata and the duration of geodynamic regimes have been established.

Key words: Fennoscandian shield; Archaean; U-Pb age; geodynamic settings.

Кичанская структура представляет собой фрагмент Тикшозерского зеленокаменного пояса, расположенный в его северной части. Установлено, что зеленокаменные образования по геохимическим характеристикам сходны с вулканогенными ассоциациями кайнозойских островных дуг [Милькевич и др., 2003; Слабунов, 2008]. Породы хорошо охарактеризованы геохимически, но нет единого мнения в отношении их стратиграфического расчленения при явном дефиците геохронологических данных. Полученные новые данные по возрасту и составу пород позволили подкорректировать имеющиеся стратиграфические схемы и установить продолжительность существования ранее выделенных геодинамических режимов. Архейские супракrustальные образования разделены нами на 3 толщ. Разрез наращивается с северо-востока на юго-запад. Породы имеют преобладающие северо-западные простирания и крутые падения в большинстве случаев на юго-запад, реже на северо-восток.

Нижняя толща (m=2000 м) развита на северо-востоке и представлена метаморфизованной в условиях амфиболитовой фации бимодальной серией в виде чередования пачек (мощностью 200-400 м) амфиболитов и гнейсов с небольшим преобладанием первых.

По химическому составу амфиболиты отвечают базальтам и андезибазальтам, имеют умеренные содержания петрогенных элементов и принадлежат толеитовой серии. Характеризуются горизонтальными спектрами распределения РЗЭ и отсутствием отрицательных Nb аномалий, что роднит их с вулканитами MORB кайнозойских геодинамических обстановок. На дискриминационной диаграмме Zr/Y-Nb/Y фигуративные точки пород попадают в поле базальтов океанических плато, имеющих плюмовый источник, и сосредоточены вблизи состава примитивной мантии. Такие геохимические особенности основных вулканитов свидетельствуют в пользу их океанической природы.

Гнейсы имеют переменный минеральный состав (Bt, Grt-Bt, Ky-Grt-Bt и Grt-Bt-Amp) и отвечают дацитам и риолитам нормальной щелочности (лавам и туфам) с натриевой специализацией. Метариолиты относятся к толеитовой серии и являются железистыми, а дациты – к известково-щелочной с магнезиальным характером. Обе группы высокоглиноземистые. Им свойственны слабо дифференцированные спектры распределения для легких лантаноидов ($La_N/Sm_N=2-5$) и горизонтальные – для тяжелых с отчетливыми Eu аномалиями ($Eu^*/Eu=0.6$) у риолитов. На спайдерграммах обе группы демонстрируют Nb-минимумы, характерные для пород надсубдукционных обстановок. На тектонических дискриминационных диаграммах Y-Nb и Yb-Ta их составы занимают неоднозначное положение, попадая в поля как внутриплитных обстановок, так и островных дуг.

Возраст кристаллизации метариолита из средней части разреза составляет 2788 ± 4 млн лет. Sm-Nd модельный возраст отвечает 2.89 млрд лет, $\epsilon Nd=2.59$, что предполагает ювенильный источник лав. Возраст кристаллизации метаандезибазальта из верхов толщи – 2765 ± 4 млн лет. Его модельный Sm-Nd возраст 2.86 млрд лет и $\epsilon Nd=2.92$ свидетельствуют в пользу мантийной природы.

Средняя толща ($m=1500$ м) представлена Grt и Pl-амфиболитами. По геохимическим характеристикам они являются аналогами метабазальтов первой толщи, но слабо обогащены Rb и Ba, что позволяет предположить в первичных расплавах присутствие субдукционного компонента. Как и основные вулканиты первой толщи, метабазальты второй толщи, скорее всего, являются продуктами глубинного плавления мантийного субстрата и сформированы в рифтогенных обстановках.

Верхняя толща ($m=2500$ м) представлена гнейсами пестрого минерального состава с вариациями содержаний темноцветных минералов (Bt, Amp, Grt, Ms и редко Px). Амфиболиты встречаются только в виде редких маломощных полос. Гнейсы представляют собой метаморфизованные средние и кислые вулканиты, амфиболиты отвечают субщелочным базальтам. В разрезах часто наблюдаются полосчатые текстуры, а в верхах толщи – реликты косоугольной слоистости, что свидетельствует о присутствии среди лав туфогенных пачек. Метавулканиты отличаются высокими содержаниями Al_2O_3 (16-20 мас. %), Sr (500-900 мкг/г), Ba (600-800 мкг/г), низкими концентрациями Y, Yb, Nb и высокими Sr/Y отношениями (30-120), что роднит их с кайнозойскими адакитами. Породы принадлежат преимущественно известково-щелочной серии нормальной щелочности, но часть проб попадает в поле толеитовой серии. Вулканиты имеют натриевую специализацию, высокоглиноземистый характер и относятся как магнезиальным, так и к железистым разностям. Все они характеризуются схожими дифференцированными спектрами распределения P3Э ($La_N/Lu_N = 10-20$), в ряде случаев с существенным обеднением тяжелыми лантаноидами (La_N/Lu_N до 33-40), без заметных европиевых аномалий. Такие спектры характерны для вулканитов современных островных дуг. Островодужная природа подтверждается также наличием отчетливых аномалий Nb и Ti и близостью к составам вулканитов островных дуг на дискриминационных диаграммах Y-Nb и Yb-Ta. Получены три возрастные датировки (U-Pb по циркону), демонстрирующие омоложение вулканической деятельности с северо-востока на юго-запад.

Метадацит из восточной части разреза имеет U-Pb по циркону возраст 2741 ± 6 млн лет. Sm-Nd модельный возраст составляет 2.84 млрд лет, $\epsilon Nd=2.67$, что позволяет говорить о ювенильной природе первичного расплава. Для туфа дацита из средней части разреза получен возраст 2734 ± 7 млн лет. Его модельный Sm-Nd возраст – 3 млрд лет и $\epsilon Nd=0.4$ указывают на коровый источник. Возраст кристаллизации циркона из метадацита западной части структуры отвечает 2716 ± 7 млн лет. Sm-Nd модельный возраст равен 2.89 млрд лет, $\epsilon Nd=1.73$, что свидетельствует о смешанной мантийно-коровой природе лав. Как видно, вулканиты верхней толщи обязаны своим происхождением разным источникам. Наиболее ранние были выплавлены из мантийного субстрата. Более поздние возникли путем парциального плавления субдуцирующей базальтовой океанической коры или явились результатом мантийно-корового взаимодействия.

Таким образом, присутствие в нижней толще единой ассоциации океанических базальтов и кислых вулканитов с геохимическими чертами островодужных пород знаменует собой переходный геодинамический



режим от островной дуги к континентальному рифту. Продолжительность этого этапа составляет чуть более 20 млн лет (от 2788 до 2765 млн лет). Излияния метабазальтов средней толщи связаны с более продвинутой стадией рифтообразования (скорее заостроводужного, чем срединно-океанического спрединга). Формирование средних и кислых вулканитов верхней толщи близко по продолжительности к первому этапу (25 млн лет) и происходило в 2741-2716 млн лет уже в условиях островной дуги, возможно эволюционирующей со временем до обстановки активной континентальной окраины (в пользу чего свидетельствует появление в верхах разреза субщелочных базальтов и туфов андезитов с косослоистыми текстурами). Метаморфическая переработка пород в условиях амфиболитовой фации имела место в палеопротерозое, что подтверждается U-Pb датировками по цирконам и титаниту, отвечающим 1788 ± 4 , 1796 ± 6 и 1786 ± 11 млн лет соответственно.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена в рамках темы НИР № FMUW-2022-0004.

Литература

Милькевич Р.И., Миллер, Ю. В., Глебовицкий, В. А., Богомолов, Е. М., Гусева, В. Ф. Толетовый и известково-щелочной магматизм в северной части Тикшозерского зеленокаменного пояса: геохимические признаки субдукционной обстановки // Геохимия. 2003. № 12.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита. Кар. НЦ РАН, Петрозаводск. 2008. 296 с.

УДК 553.46

**ТОЛЕИТОВЫЙ БАЗИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ,
СВЯЗАННЫЙ С ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОТЕРОЗОЙСКИХ
АНОРТОЗИТ-МАНГЕРИТ-ЧАРНОКИТ-ГРАНИТНЫХ (АМСГ) КОМПЛЕКСОВ: ПРИМЕР
МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ФЕРРОБАЗАЛЬТОВ ЛАДОЖСКОГО ГРАБЕНА (КАРЕЛИЯ)**

Носова А.А., Лебедева Н.М., Возняк А.А.

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Москва, Россия, ilsanora@mail.ru*

Геодинамическая позиция и петрология АМСГ комплексов остаются во многом дискуссионными. На заключительной стадии становления этих комплексов на Восточно-Европейском кратоне около 1.45 млрд лет проявился ферробазальтовый магматизм, известный в Ладожском грабене. Предполагается, что этот магматизм связан с посторогенным растяжением литосферы в области сочленения палеопротерозойского свекофенского и архейского Карельского доменов.

**THOLEITIC BASITIC MAGMATISM COEVAL WITH PROTEROZOIC ANORTHOSITE-
MANGERITE-CHARNOKITE-GRANITE (AMCG) COMPLEXES: EXAMPLE OF MESOPROTEROZOIC
FERROBASALTS IN THE LADOGA GRABEN (KARELIA)**

Nosova A.A., Lebedeva N. M., Vozniak A.A.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia

Tectonic setting and petrology of the AMCG magmatism remain under discussion. Ferrobasalt magmatism took place at the final stage of an emplacement of the AMCG complexes of the East European Craton, at 1.45 Ga in the Ladoga graben. This magmatism may be related to the postorogenic extension of the lithosphere in the area of the junction of the Paleoproterozoic Svekofenian and the Archean Karelian domains.

Анортозит-мангерит-чарнокит-гранитные (АМСГ) комплексы являются магматическими образованиями, специфическими для протерозоя. Геодинамическая позиция и петрология этих комплексов остаются во многом нерешенными проблемами. На какой стадии геологического развития структур появляются эти комплексы: коллизионной, на пике гранулитового метаморфизма, на стадии посторогенного растяжения или они являются анорогенными? Какие петрологические процессы приводят к появлению сильно обогащенных Fe, P и Ti пород: фракционирование плагиоклаза с образованием анортозитов и отсадкой ильменит-апатитового кумулула или жидкостная несмесимость? Каковы источники мафических расплавов этих комплексов – метасоматизированная литосферная мантия, астеносферный диапир или глубинный плюм? Каков был состав первичного расплава: толеитовый базальтовый или пикритовый? Как удавалось подниматься сквозь кору обогащенным железом высокоплотным расплавам, и какую роль играл CO₂ флюид в петрогенезисе пород АМСГ –комплексов? Эти вопросы являются предметом оживленных дискуссий.

В последнее время исследователи обращают внимание на временную и пространственную сопряженность магматизма АМСГ типа и толеитового. Как показано в [Shumlyanskyu et al., 2021], на Украинском щите одновременно с формированием 1.75–1.80 млрд лет назад АМСГ плутонов (Коростеньский и др) проявился толеитовый магматизм Прутивско-Новогольской провинции, представленный долеритами, субщелочными габбро, высоко-Ti пикритами и кимберлитами. По мнению авторов, образование провинции связано с суперплюмом.

В отношении понимания геодинамической позиции и характера эволюции расплавов магматизма АМСГ типа Восточно-Европейского кратона, несмотря на многочисленные и обстоятельные исследования, также все

еще остаются нерешенными ряд вопросов. На северо-западе Восточно-Европейского кратона внедрение преимущественно мезопротерозойских АМСГ массивов происходило в интервале 1670 – 1445 млн лет. Относительно их приуроченности к определенному либо вообще какому-либо орогенному событию существуют значительные расхождения во взглядах. Одни исследователи считают, что массивы имеют анорогенную позицию, что поддерживается свидетельствами пенеппленизации территории перед внедрением массивов; другие исследователи полагают, что АМСГ массивы связаны с пространственно отдаленными орогенными событиями на западе кратона, такими как готские (1.62–1.58 млрд лет) и галландианские/данополюнские (1.55–1.45 млрд лет), так как с этими орогенными событиями совпадают два основных пульса АМСГ магматизма, см. обзор в [Johansson et al., 2022]. Отдельные исследователи, акцентируя сопряженность АМСГ массивов с локальными рифтовыми структурами, а также их положение в области коры, утоненной в свекофенских посторогенных событиях, предполагают связь АМСГ магматизма с процессами посторогенного растяжения (например, [Puura and Floden, 1999]).

Если для раннего импульса АМСГ магматизма (1.67–1.6 млрд лет), к которому принадлежат такие батолиты как Выборгский, Рижский, синхронность с готскими орогенными событиями и приуроченность к области свекофенской коры, испытавшей наиболее сильное посторогенное утонение, позволяет обосновано предпочесть одну из тектонических гипотез формирования, то тектоническая позиция «поздних» АМСГ массивов (1.55–1.45 млрд лет; Салминский массив, Мазурский комплекс, мелкие массивы Прибалтики и Беларуси, Рагунда и дайковые рои в Швеции, Валаамский силл и ферробазальты Ладожского грабена) более неопределенна, вплоть до того, что их рассматривают как отдельную внутриплитную провинцию, не связанную непосредственно с «ранними» АМСГ массивами Восточно-Европейского кратона [Johansson et al., 2022].

Установление возраста в 1.46–1.45 млн лет для ферробазальтового магматизма и его более кислых дериватов в Ладожском грабене [Salminen, Pesonen, 2007; Lubnina et al., 2010] указывает на синхронность «позднего» (1.55–1.45 млрд лет) АМСГ магматизма в западной и восточной частях Свекофенского домена. Исследования мезопротерозойского магматизма Ладожского грабена могут дать новую информацию для решения вопроса о геодинамической природе «поздних» АМСГ массивов.

Ладожский грабен был заложен в начале мезопротерозоя в области сочленения архейского Карельского кратона и палеопротерозойского свекофенского орогена. Грабен выполнен 650–метровой толщей осадков и вулканитов, в его восточном борту расположен крупный Салминский плутон гранитов рапакиви-кварцевых диоритов-анортозитов-габброноритов возрастом 1.55–1.52 млрд лет [Amelin et al., 1997]. Центральная часть рифта вмещает крупный Валаамский силл феррогаббро-монцититов с возрастом 1.46 млрд лет [Salminen, Pesonen, 2007], в центральной и восточной частях распространены покровы ферробазальтов и дайки ферродиоритов с возрастом 1.45 млрд лет [Lubnina et al., 2010].

Ферробазальты залегают на маломощной пачке континентальных осадков, в том числе туффитов, перекрывающих эродированную поверхность Салминского плутона и кору выветривания по вмещающим его метаморфическим породам палеопротерозоя. Две толщи ферробазальтов разделены пачкой осадков такого же типа.

Наши исследования показали, что ферробазальты имеют минералогические и геохимические характеристики, типичные для мафических пород АМСГ комплексов. Фенокристы в ферробазальтах представлены железистыми разновидностями оливина ($Mg\#$ 0.47–0.36), ортопироксена и клинопироксена ($Mg\#$ 0.52–0.62), а также ильменитом. Для апатитов характерны высокие содержания фтора (3.7–4.2 мас. %). В породах также наблюдаются проявления несмесимости с разделением на высоко-кремнистую и высоко-железистую жидкости.

Породы обогащены Ti, P и Fe, а также несовместимыми элементами (LILE, HFSE) и имеют фракционированное распределение HREE, что сближает их с йотунитами. Геохимические особенности пород указывают на возможный вклад метасоматизированного литосферного мантийного источника [Ларин, 2009].

Эпизод метасоматоза, который создал такой источник в литосферной мантии, наиболее вероятно был связан с щелочным и щелочно-карбонатитовым магматизмом 1.8 млрд лет на посторогенном этапе свекофенского орогенеза [Andersson et al., 2006]. Изотопные Nd параметры ферробазальтов ($\epsilon\text{Nd}(t) \sim -5$) не противоречат такому предположению с учетом изотопного состава щелочных пород с возрастом 1.8 млрд лет в Приладожье [Andersson et al., 2006] на возраст 1.45 млрд лет ($\epsilon\text{Nd}(t) \sim -5 \dots -6$).

Частичное плавление такого источника могло произойти под воздействием астеносферного диапира. В свою очередь, подъем астеносферы мог быть связан с растяжением на периферии области переутолщенной свекофенской литосферы при возможной деламинации этой литосферы.

Представляется, что появление ферробазальтовых расплавов на финальной стадии позднего пульса АМСГ магматизма связано с завершением длительно протекавших свекофенских посторогенных событий и отражает растяжение метасоматизированной свекофенской литосферы в месте ее сочленения с более холодной литосферой архейского Карельского кратона, что могло обеспечить пути подъема таких расплавов.

Благодарности и источник финансирования. Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 27–22–318.

Литература

Ларин А.М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 402 с.

Amelin Y., Larin A., Tucker R. Chronology of multiphase emplacement of the Salmi rapakivi granite-anorthosite complex, Baltic Shield: implications for magmatic evolution // Contrib. Mineral. Petrol. 1997. Vol. 127. P. 353–368.

Lubnina N.V., Mertanen S., Söderlund U., et al. A new key pole for the East European Craton at 1452Ma: Palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia) // Precambrian Research. 2010. V. 183. № 3. P. 442–462.

Puura V., Floden T. Rapakivi-granite–anorthosite magmatism – a way of thinning and stabilisation of the Svecofennian crust, Baltic Sea Basin // Tectonophysics. 1999. V. 305 P. 75–92.

Salminen J., Pesonen L. Paleomagnetic and rock magnetic study of the Mesoproterozoic sill, Valaam island, Russian Karelia // Precambrian Research. 2007. V. 159. P. 212–230.

Shumlyansky L., Ernst R.E., Albekov A., et al. The early Statherian (ca. 1800–1750 Ma) Prutivka-Novogol large igneous province of Sarmatia: geochronology and implication for the Nuna/Columbia supercontinent reconstruction // Precambrian Research. 2021. V. 358. 106185.

УДК 552.31

МАГМАТИЗМ ДОНСКОГО ТЕРРЕЙНА ВОЛГО-ДОНСКОГО ОРОГЕНА**Петракова М.Е.^{1,2}, Савко К.А.², Балтыбаев Ш.К.¹**¹*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, maribya@mail.ru*²*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*

Рассмотрены палеопротерозойские магматические комплексы западной части Волго-Донского орогена. Донской террейн развивался как вулканическая дуга на континентальной коре, а Лосевский на океанической. Об этом свидетельствуют гранитоиды с разными геохимическими и изотопно-геохимическими характеристиками, которые формировались в результате постколлизонного растяжения коры орогена.

Ключевые слова: Донской террейн, Волго-Донской ороген, магматизм.

MAGMATISM OF THE DON TERRANE VOLGA-DON OROGEN**Petrakova M.E.^{1,2}, Savko K.A.², Baltybaev Sh.K.¹**¹*Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia*²*Voronezh State University, Voronezh, Russia*

The Paleoproterozoic igneous complexes of the western part of the Volga-Don orogen are considered. The Don terrane developed as a volcanic arc on the continental crust, while the Losevo terrane developed on the oceanic one. This is evidenced by granitoids with different geochemical and isotope-geochemical characteristics, they were formed by postcollisional extension of the orogen crust.

Key words: Don terrane, Volga-Don orogen, magmatism.

Палеопротерозойский Волго-Донской ороген (ВДО) выделяется сравнительно недавно, его формирование связано с предшествующей коллизией Сарматии и Волго-Уралии 2.1 млрд лет назад [Щипанский и др., 2007; Bogdanova et al., 2012]. ВДО (рис. 1) перекрыт осадочным чехлом и сведения о его составе и строении получены по немногочисленным материалам бурения. Слабо изученным вопросом является строение и состав западного борта ВДО, в зоне его стыка с архейскими породами Курского блока. В большинстве работ [Щипанский и др., 2007 и ссылки в ней] данную область рассматривали в составе единой Лосевской (Липецко-Лосевкой) шовной зоны (ЛШЗ). В данном сообщении делается попытка суммировать современные данные о магматизме этой части ВДО, и показать, что северная и южная части ЛШЗ отличаются автономным эндогенным развитием.

Вещественную неоднородность ЛШЗ отмечали и ранее [Египко, 1971; и др.]. Например, на геологической карте Воронежского кристаллического массива толщи отнесены к позднему архею, с выделением северной «лосевской ассоциации» и южной – «донской». В недавних работах появились доказательства палеопротерозойского возраста пород этой структуры [Щипанский и др., 2007; Terentiev et al., 2017].

Нет единого мнения о природе пород и обстановке накопления лосевской серии (*Лосевского террейна*, *ЛТ*). Предполагается внутриконтинентальный рифтогенез [Чернышов и др., 1997], активная окраина восточно-тихоокеанского (кордильерского) [Щипанский и др., 2007] или западно-тихоокеанского типа, или система «окраинный бассейн – островная дуга» [Терентьев, 2016; Terentiev et al., 2017].

Вулканогенно-осадочные породы донской серии в составе *Донского террейна* (*ДТ*) стали выделяться недавно [Savko et al., 2014; Терентьев, 2018; Terentiev et al., 2020], но достоверные данные о их возрасте отсутствуют. Серия сложена мелкозернистыми биотитовыми гнейсами и амфиболитами, мраморами и кальцифирами. Метаморфизованные вулканиды относятся к известково-щелочной высококалийевой серии и разделяются на железистую и высокомагнезиальную ветви. Вулканиды донской серии близки к известково-

щелочным породам лосевской серии, однако отличаются более высокими содержаниями калия, тория [Терентьев, 2018]. Накопление толщ донской серии происходило в морском бассейне, что подтверждается прослоями мраморов и известково-силикатных пород (протолиты – известняки и мергели).

Породы лосевской и донской серии сильно отличаются от пород восточной части ВДО – так называемой воронцовской серии (в составе *Воронцовского террейна, ВТ*). Этот террейн сложен осадками турбидитового типа, представленные флишоидными песчано-сланцевыми отложениями [Щипанский и др., 2007].

В ДТ преобладают магнезиальные гранитоиды павловского комплекса возрастом 2.08–2.07 млрд лет [Terentiev et al, 2020] и железистые монцогаббро–гранодиориты потуданского комплекса возрастом 2.06 млрд лет [Петракова и др., 2022] (рис 1). Породы резко обогащены LILE и LREE, особенно Ba, Sr, имеют $\epsilon_{Nd}(t)$ от +0.2 до –4.2. ϵ_{Nd} мафитов потуданского комплекса ниже, чем в кислых разностях павловского. В гранитоидах павловского комплекса ядра циркона до 2.8 млрд лет свидетельствует о контаминации древней архейской корой.

ЛТ и ВТ сложены ювенильными породами возраста 2.2–2.1 млрд лет. ВТ содержит многочисленные тела гранитов S- и A-типа [Savko et al., 2014] и массивы ультраосновного-основного состава, тогда как в ЛТ и ДТ ТТГ-гранит и высоко-Mg гранитоиды преобладают над базитами. Граниты S- и A-типов образовались 2.05–2.07 млрд лет назад, имеют $\epsilon_{Nd}(t)$ от +2.0 до +2.6. Граниты S-типа рассматриваются как продукты плавления метаосадков [Savko et al., 2014].

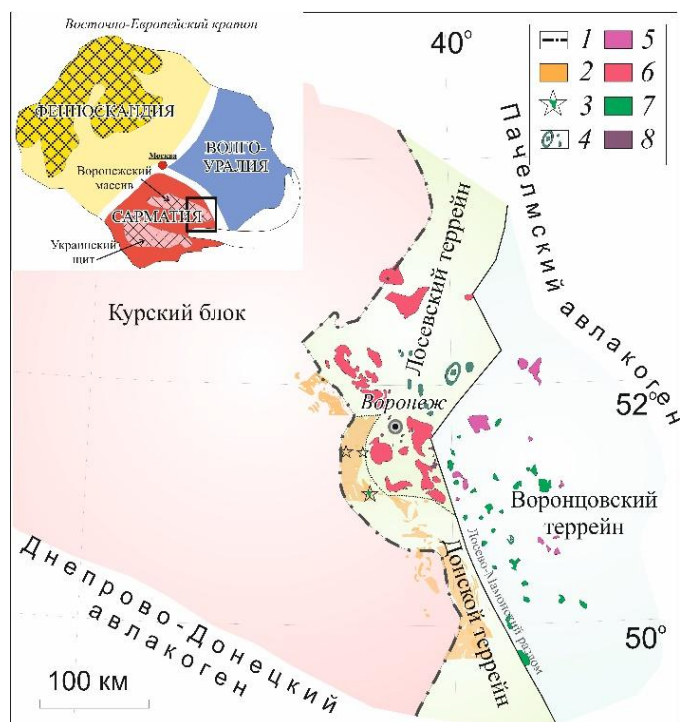


Рис. 1. Стрoение западной части ВДО. 1 – западная граница ВДО; магматические комплексы: 2 – павловский гранитоидный; 3 – потуданский монцогаббро–гранодиоритовый; 4 – ольховский диорит-лейкогранодиоритный; 5 – бобровский гранитов А- и S-типа; 6 – усманский тоналит–диорит–гранодиоритовый; 7 – мамонский и еланский базит-гипербазитовые; 8 – рождественский метагабброидный.

Fig. 1. Schematic structure of the western part of the Volga-Don orogen. 1 – a western boundary of the orogen; 2 – Pavlovsk granitoids; 3 – Potudan monzogabbro–granodiorite; 4 – Olkhovskiy diorite-leucogranodiorite; 5 – Bobrov A- and S-type granites; 6 – Usman tonalite–diorite–granodiorite; 7 – Mamon and Elan mafic-ultramafic; 8 – metamorphosed gabbroids of the Rozhdestvensky complex.

Латеральная изменчивость с ростом его в сторону Курского блока K_2O , LILE и LREE, понижение величины ϵ_{Nd} в павловских гранитоидах в сравнении с гранитоидами ЛТ, дает основание думать, что породы ДТ формировались «на» или «вблизи» окраины древнего континента, чему не противоречат геофизические данные о присутствии архейской континентальной коры в ДТ [Минц и др., 2017].

Существенные различия в литологии породных ассоциаций ЛШЗ позволяют рассматривать ее северную и южную части, отличающиеся не только структурно-вещественно, но и имеющие индивидуальные черты геологической эволюции. Об этом свидетельствуют, в частности, гранитоиды с разными геохимическими и изотопно-геохимическими характеристиками. Указанное позволяет выделить Лосевский (на севере) и Донской (на юге) террейны в составе этой шовной зоны.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0002 Минобрнауки России.

Литература

Египко О. И. Некоторые минералого-петрографические и геохимические особенности докембрийских гранитоидов юго-восточной части Воронежского кристаллического массива: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук / Воронеж. 1971. 367 с.

Минц М. В., Глазнев В. Н., Муравина О. М. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник ВГУ. Серия. Геология. 2017. № 4. С. 5–23

Петракова М. Е., Терентьев Р. А., Юрченко А. В., Савко К. А. Геохимия и геохронология палеопротерозойских кварцевых монцогаббро–монциодорит–гранодиоритов плутона Потудань, Волго–Донской ороген // Вестник СПбГУ: Науки о Земле. 2022. Т. 67(1). С. 74–96. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.105>

Терентьев Р. А., Савко К. А. Высокомагнезиальные низкотитанистые габбро–гранитные серии в палеопротерозое восточной Сарматии: геохимия и условия формирования // Геология и геофизика. 2016. С. 1155–1183.

Чернышов Н. М., Ненахов В. М., Лебедев И. П., Стрик Ю. Н. Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива // Геотектоника. 1997. № 3. С. 21–30.

Щипанский А. А., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Ларионова Ю. О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. №1. С. 43–70.

Bogdanova, S. V. Postnikov A. V., Bibikova E. V. The Volga-Don orocline stitching Volgo-Sarmatia // Geophysical Research Abstracts 14. EGU. 2012.

Savko K. A., Samsonov A.V., Larionov A. N., Larionova Yu. O., Bazikov N. S. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin // Petrology. 2014. V.22. No. 3. P. 205–233.

Terentiev R. A. Savko K. A., Santosh M. Paleoproterozoic Evolution of the Arc-back-arc System in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): Zircon SHRIMP Geochronology and Geochemistry of the Losevo Volcanic Suite // American Journal of Science. 2017. V. 317. P. 707–753.

Terentiev R. A., Savko K. A., Petrakova M. E., Santosh M., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // Precambrian Research. 2020. V. 346. P. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>

УДК 552.4+550.93

ПСЕВДОТАХИЛИТЫ ГЛАВНОГО АНАБАРСКОГО РАЗЛОМА (АНАБАРСКИЙ ЩИТ) – ПЕТРОЛОГО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ВОЗРАСТ ДЕФОРМАЦИЙ

О. П. Полянский, А. Д. Ножкин, Э. В. Сокол

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия, pol@igm.nsc.ru

В работе представлены результаты выполненного впервые $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования жильного материала псевдотахилита из деформационной зоны Главного Анабарского разлома (Северная Якутия). С использованием принципов термохронологии и реологических параметров деформации реконструирована глубина формирования псевдотахилитов. Их $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст (1910 ± 24 млн лет) сопоставлен с этапами формирования главных деформационных поясов Анабарского щита. Дана термохронологическая интерпретация полученных результатов. Предложен способ оценки глубины деформаций и величины дифференциальных напряжений.

Ключевые слова: псевдотахилит, Анабарский щит, деформации, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст, реология

**PSEUDOTACHYLITES OF THE MAIN ANABAR FAULT (ANABAR SHIELD):
PETROLOGICAL-RHEOLOGICAL INDICATORS OF MELTING AND AGE OF DEFORMATIONS**

O. P. Polyansky, A. D. Nozkin, E. V. Sokol

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

The results of the $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ dating of the vein material of pseudotachylite from the deformation zone of the Main Anabar fault (Northern Yakutia) are presented. The depth of formation of pseudotachyllites is reconstructed using the principles of thermochronology and rheological parameters of deformation. Their $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ age (1910 ± 24 Ma) is compared with the stages of formation of the main deformation belts of the Anabar Shield. A thermochronological interpretation of the results obtained is given. A method for estimating the depth of deformations and the magnitude of differential stresses is proposed.

Keywords: pseudotachylites, Anabar shield, deformations, $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ age, rheology

Выполненные ранее реконструкции времени формирования деформационных поясов Анабарского щита опирались на возраста синтетектонических мигматитов либо сопутствующих метаморфических, магматических или импактных событий. Они установлены в интервалах 1920 ± 10 , 1916-1899 и 1900 ± 50 млн лет, соответственно. Однако возраст деформаций в пределах Главного Анабарского разлома до сих пор оставался неизвестным. С этой целью мы предприняли исследование пород из зоны разлома, претерпевших высокоскоростные тектонические деформации и локальное частичное плавление. В качестве индикаторов деформационных процессов были использованы продукты дислокационного метаморфизма – псевдотахилиты (ПСТ). Эти породы состоят из стекловатого или тонкозернистого матрикса с реликтами зерен минералов или фрагментов вмещающей породы (рис. 1). Использование ПСТ уже доказало свою эффективность при датировании этапов тектогенеза докембрийских метаморфических комплексов [Морозов и др., 2020], а также при оценке динамических и термохронологических характеристик сейсмогенных разломов [Kirkpatrick et al., 2012].

Образцы анабарских псевдотахилитов (рис. 1 а,б) были взяты из одного обнажения, где в зоне шириной ≈ 50 м они формируют систему многочисленных тонких (0.1-1.0 до 15 см) прожилков, секущих толщу сложного состава (биотит-гиперстеновые плагиогнейсы, двуполевошпатовые гнейсы, чарнокиты и двупироксен-плагиоклазовые кристаллосланцы) [Лутц, 1962]. Для определения $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраста деформационных событий в зоне Главного Анабарского разлома был выбран наиболее однородный образец ПСТ А-153-90 с валовым

содержанием K_2O – 0.82 мас.%. Определение Ag-Ag возраста проводилось в “ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН” (Новосибирск).

В возрастном спектре ПСТ присутствует отчетливое плато из 7 последовательных ступеней (99% выделенного ^{39}Ar). Рассчитанный по нему $^{40}Ar/^{39}Ar$ -возраст составил 1910 ± 24 млн лет. Интерпретация полученного значения возраста основывается на принципе температуры «закрытия» K/Ar изотопной системы. При скорости остывания 1-100°C/млн лет закрытие изотопной системы калишпата происходит в диапазоне температур 295-370°C [Бахтер, 2010]. Таким образом, полученный возраст соответствует моменту остывания псевдотахилита до $T \leq 370^\circ C$. Учитывая стремительную закалку расплава, времена его генерации и стеклования совпадают в пределах аналитической погрешности. Чтобы определить глубину породы на момент 1910 млн лет, был выполнен расчет палеогеотермы с учетом реальных теплофизических параметров и содержания радиоактивных элементов (U, Th, K) в породах Анабарского щита [Розен, 1992].

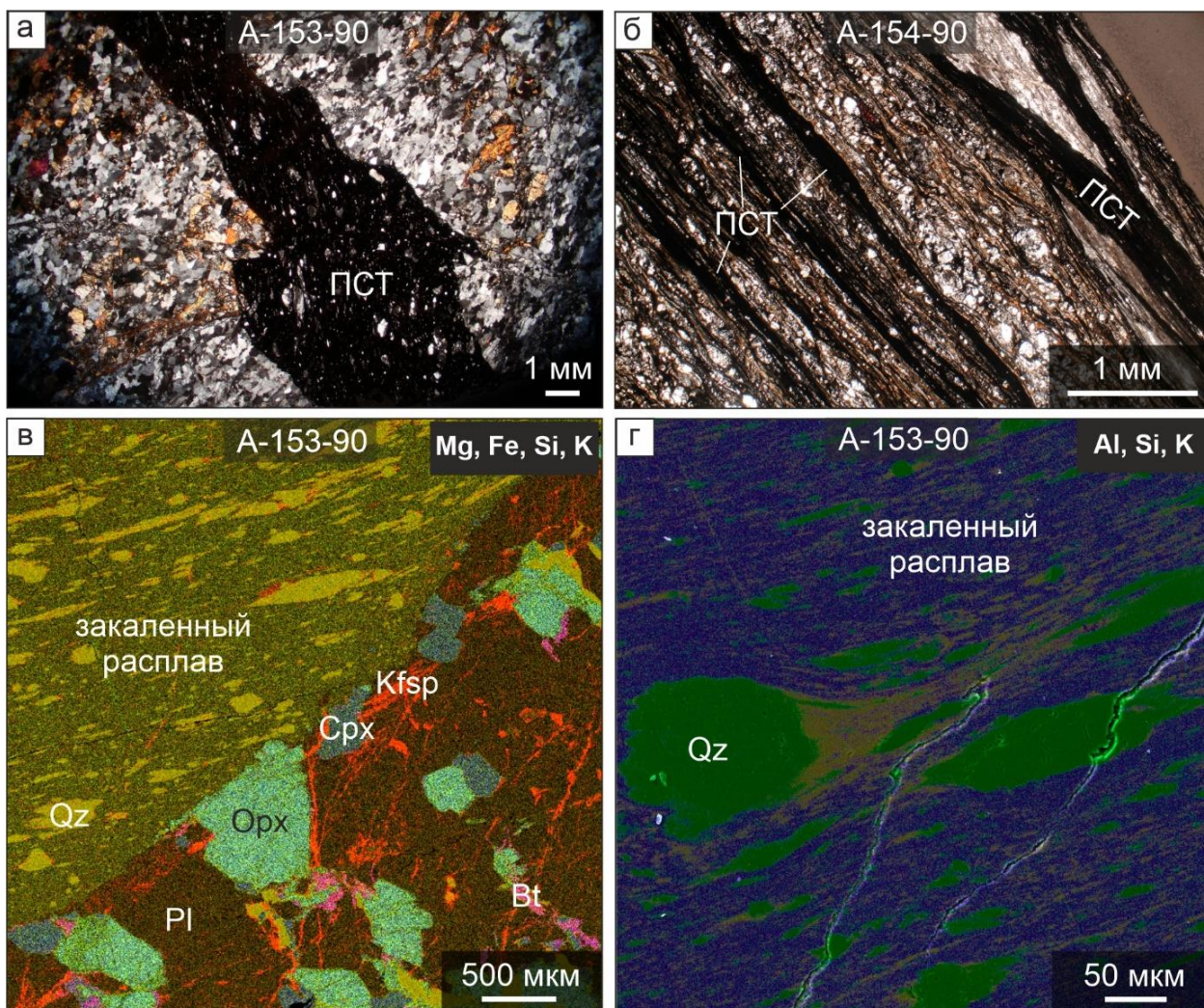


Рис. 1. Структуры и текстуры псевдотахилитов. Оптические изображения, николи + (а, б), и многослойные карты характеристического излучения Mg, Fe, Al, Si и K (в, г): а – жильный псевдотахилит (ПСТ); б – чередование полос катаклазита по мигматизированному основному кристаллосланцу, милонита и псевдотахилита; в – резкий контакт псевдотахилитового прожилка и вмещающего биотит-двупироксенового плагиогнейса; г – распределение реликтов пластично деформированных зерен кварца в псевдотахилитовом прожилке.

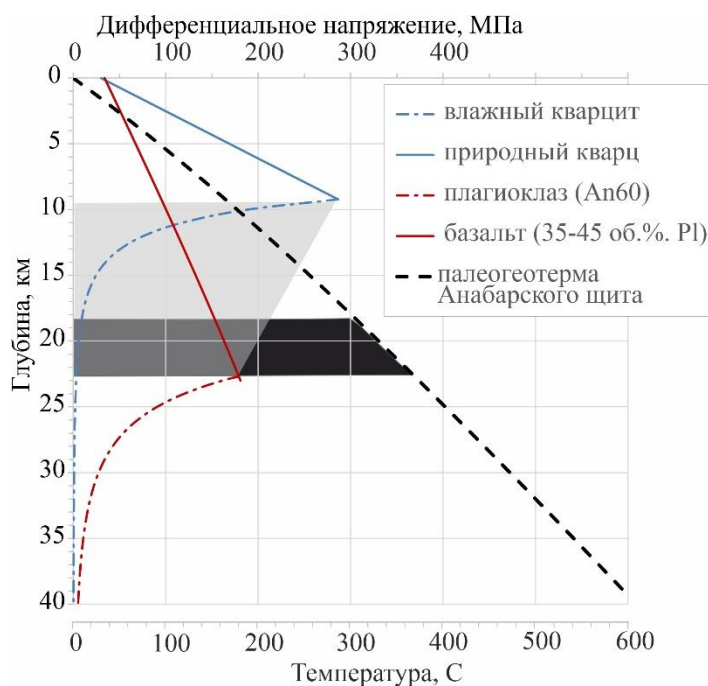


Рис. 2. Профили предельных дифференциальных напряжений в кварце и плаггиоклазе (верхняя горизонтальная ось), характеризующие параметры перехода хрупких в ползучие деформации. Зависимости построены для Qtz- и Pl-содержащих материалов с использованием реологических данных из (Полянский и др., 2022). Скорость деформации ползучести принята 10^{-15} с^{-1} . Пунктирная линия - палеогеотерма (нижняя ось), построенная на основе данных о содержании радиоактивных источников тепла в нижнепротерозойских тектонит-гранит-мигматитовых породах Анабарского щита. Серым показан интервал глубины, а черным – интервал T датируемого события.

Из палеогеотермы следует, что фрикционное плавление и связанное с ними образование псевдотрахилитов происходило не глубже 18-23 км (4.9-6.2 кбар). Приведенная оценка глубины датируемого события, вызвавшего фрикционное плавление, согласуется с экспериментальными данными о реологическом поведении пород кварц-полевошпатового состава. На рис. 2 приведены профили предельных дифференциальных напряжений, испытываемых породами с преобладанием кварца либо плаггиоклаза. Напряжения подчиняются закону Мора-Кулона при хрупко-пластической деформации (линейные участки профиля) и закону дислокационной ползучести (крипа) (участки с экспоненциальной зависимостью от температуры). С учетом построенной палеогеотермы, переход от хрупких деформаций в режим ползучести происходит в диапазоне от $\sim 200^\circ\text{C}$ (кварц, влажный кварцит) до $\sim 370^\circ\text{C}$ (плаггиоклаз, базальт с 35-45% Pl). Температура закрытия K/Ar изотопной системы КПШ в зависимости от скорости охлаждения составляет $290-370^\circ\text{C}$, что попадает в интервал PT -условий, при которых кварц переходит в состояние крипа, а плаггиоклаз еще остается хрупким, как это наблюдается в шлифах ПСТ.

Мы предполагаем образование ПСТ путем фрикционного плавления кислого гранулитового протолита в условиях быстропротекающего, возможно, сейсмического события. Такими событиями могут являться взбросовые перемещения по Анабарскому разлому и подъем гранулитовых комплексов нижней коры. Коллизионный характер движений со взбросами в ЮЗ направлении отмечается для конца раннепротерозойского времени для двух основных деформационных поясов Анабарского щита - Котуйканской и Билляхской коллизионных зон [Милановский и др., 2017]. В процессе коллизии породы с глубины гранулитового метаморфизма 33-41 км (9-11 кбар, [Ножкин и др., 2019]) были перемещены на среднекоровый



уровень (18-23 км) в результате высокоскоростных (сейсмогенных) деформаций, сопровождавшихся локальным плавлением.

Таким образом, псевдотахилиты Главного Анабарского разлома являются индикаторами деформаций, связанных с эксгумацией высокометаморфизованных комплексов, а сам разлом может рассматриваться в качестве одноранговой коллизийной структуры наряду с основными деформационными зонами Анабара.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена по госзаданию ИГМ СО РАН.

Литература

Милановский С.Ю., Кабан М.К., Розен О.М., Егоркин А.В. Геофизические особенности строения коры Анабарского щита // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2017. Вып. 36. № 4. С. 56-71.

Морозов Ю. А., Юдин Д. С., Травин А. В. и др. Первые находки и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование псевдотахилитов в палеопротерозойском зонально метаморфизованном ладожском комплексе Фенноскандии // Доклады РАН, 2020. Т. 493 № 1. С. 5–9.

Kirkpatrick J. D., Dobson K. J., Mark D. F. et al. The depth of pseudotachylyte formation from detailed thermochronology and constraints on coseismic stress drop variability // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. B06406. <https://doi.org/10.1029/2011JB008846>

Лутц Б.Г. Псевдотахилиты Анабарского массива и вопросы их генезиса // Геология и геофизика. 1962. № 11. С. 98-102.

Baxter E.F. Diffusion of Noble Gases in Minerals. Rev. Mineral. Geochem., Diffusion in Minerals and Melts. (Y.Zhang, D.J.Cherniak, eds), 2010. V.72. P. 509-558.

Розен О.М. Теплогенерация земной коры Анабарского щита и проблемы формирования нижней коры континентов // Геология и геофизика. 1992. №12. С. 22-29.

Ножкин А.Д., Лиханов И.И., Савко К.А. и др. Сапфиринсодержащие гранулиты Анабарского щита // Геохимия. 2019. Т. 64. № 5. С. 486-502. doi: 10.1134/S0016702919050070

Полянский О.П., Ножкин А.Д., Сокол Э.В., Зиновьев С.В., Семенов А.Н., Некипелова А.В. Псевдотахилиты Главного Анабарского разлома (Северная Якутия) – петрологические и хронологические индикаторы плавления при высокоскоростных тектонических деформациях// Доклады РАН. Науки о Земле, 2022, том 503, № 1, с. 18–25. DOI: 10.31857/S2686739722030094

**ВОЗРАСТНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЕРХНЕГО ДОКЕМБРИЯ
ПРИПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО УРАЛА:
К ВОПРОСУ О ВРЕМЕНИ ЗАЛОЖЕНИЯ ТИМАНСКОЙ ПАССИВНОЙ ОКРАИНЫ**

А.М. Пыстин, Ю.И. Пыстина, О.В. Гракова, Н.С. Уляшева

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, pustin@geo.komisc.ru

Дан анализ U-Pb датировок детритовых цирконов из базальных отложений верхнего докембрия Приполярного и Полярного Урала. Приведенный материал с учетом имеющихся данных по другим районам севера Урала, а также Тимана свидетельствует о том, что в отличие от Южного Урала, где известен полный разрез рифея, тимано-североуральский верхний докембрий начинается с отложений, пограничных по возрасту между средним и поздним рифеем, скорее всего, позднерифейских. Это указывает на позднерифейское время заложения Тиманской пассивной окраины. Высказано предположение, что северо-восток Балтики в допозднерифейское время находился во внутренней части фрагмента Колумбии, избежавшей деструкции вплоть до вхождения Балтики в Родинию.

Ключевые слова: Полярный Урал, верхний докембрий, базальные отложения, петрогеохимические данные, детритовые цирконы, U-Pb возраст.

**AGE RESTRICTIONS OF THE UPPER PRECAMBRIAN SUBPOLAR AND POLAR URALS:
ON THE QUESTION OF THE TIMING OF THE FORMATION OF THE TIMAN PASSIVE MARGIN**

A.M. Pystin, Yu.I. Pystin, O.V. Grakova, N.S. Ulyasheva

Institute of Geology Komi Scientific Center, Ural Branch of the RAS, Syktyvkar, Russia

An analysis of U-Pb datings of detrital zircons from Upper Precambrian basal deposits of the Subpolar and Polar Urals is given. The presented material, taking into account the available data for other regions of the north of the Urals, as well as Timan, indicates that, in contrast to the Southern Urals, where the complete Riphean section is known, the Timan-North Urals Upper Precambrian begins with deposits bordering in age between the Middle and Late Riphean, most likely Late Riphean. This indicates the Late Riphean time of the Timan passive margin. It has been suggested that in Pre-Late Riphean times, the northeast of Baltica was located in the inner part of the fragment of Columbia, which avoided destruction until the entry of Baltica into Rodinia.

Key words: Polar Urals, Upper Precambrian, basal deposits, detrital zircons, U-Pb age.

Одной из важнейших проблем геологии докембрия северной части Урала является выделение и обоснование возраста базальных отложений верхнего протерозоя, решение которого связано с вопросом о времени заложения Тиманской пассивной окраины. В последние годы было установлено, что на севере Урала в отличие от его южных районов отсутствуют нижнерифейские отложения. Выделяемые в стратиграфических схемах Приполярного Урала нижнерифейские стратоны: маньхобейнская и шокуринская свиты [Стратиграфические..., 1993] на самом деле принадлежат к нижнепротерозойскому кристаллическому основанию [Глубинное..., 2011; Пыстин, Пыстина, 2019]. При этом, маньхобейнская свита выделена ошибочно на месте средне-низкотемпературных диафоритов по породам няртинского гнейсо-мигматитового комплекса, залегающего в нижней части разреза приполярноуральского докембрия. Возраст раннего этапа метаморфизма пород, слагающих няртинский комплекс и шокуринскую свиту, около 2.1 млрд лет [Пыстин, Пыстина, 2019].

Верхнедокембрийский разрез на Приполярном Урале начинается с пуйвинской свиты, на Полярном Урале – няровейской серии.

Пуйвинская свита залегает со стратиграфическим и структурным несогласием на породах няртинского гнейсо-мигматитового комплекса и метатерригенно-карбонатной шокуринской свиты раннепротерозойского

возраста. Свита сложена серыми и зеленовато-серыми слюдисто-альбит-кварцевыми сланцами с прослоями амфиболовых и известковых сланцев и кварцитов. В основании пуйвинской свиты фрагментарно выделяется ошизская толща слюдисто-полевошпатовых кварцитов и кварцито-песчаников с линзами гравелитов и конгломератов. Мощность ошизкой толщи достигает 350 м, а разреза пуйвинской свиты в целом – 1600 м. Среднерифейский возраст свиты принимается на основании ее залегания под фаунистически охарактеризованными верхнерифейскими толщами, а также по наличию в породах среднерифейских (?) микрофоссилий, диагностика которых признается не очень надежной.

Няровейская серия обрамляет харбейский и марункеуский метаморфические комплексы раннепротерозойского возраста. Она залегает на глубокометаморфизованных породах со стратиграфическим и структурным несогласием. Среднерифейский возраст пород обосновывается по их положению под известняками немурюганской свиты с микрофитолитами позднего рифея. Серия (снизу вверх) подразделяется на терригенно-карбонатную верхнехарбейскую свиту мощностью 400–500 м и терригенно-вулканогенную минисейшорскую свиту мощностью 1400–1500 м [Государственная..., 2014].

Для уточнения временных границ формирования базальных отложений верхнего протерозоя Приполярного и Полярного Урала (пуйвинской свиты и няровейской серии), а также установления возраста размываемых пород субстрата были выполнены изотопные исследования детритовых цирконов из метатерригенных отложений U-Pb LA-SF-ICP-MS методом в Геологическом институте СО РАН (Россия, г. Улан-Удэ).

Проба (№ 21) для выделения цирконов из пород пуйвинской свиты была отобрана на правом берегу руч. Николайшор (левого притока р. Кожим) в 7.5 км выше устья (65.0468° с.ш., 60.6098° в.д.). Здесь обнажается нижняя часть свиты, сложенная серыми мелко-среднезернистыми биотит-(хлорит)-мусковит-альбит-кварцевыми сланцами. Цирконы представлены в основном хорошо окатанными зернами шаровидной и эллипсоидной формы, окрашенными в дымчатые и коричневато-кремовые тона. Размер зерен 0.10–0.25 мм, поверхность равномерно шероховатая. Циркон с максимальной датировкой имеет раннепротерозойский возраст – 1959±52 млн лет, с минимальной – позднерифейский – 867±71 млн лет. Основная выборка возрастов, включающая 93 анализа (или 99%), охватывает интервал 867–1579 млн лет. Датировки группируются в две возрастные популяции: 1179–867 млн лет (67% анализов) и 1579–1274 (30% анализов). Минимальные значения датировок детритовых цирконов (867±71, 889±55, 892±86, 907±54, 909±46, 910±77 млн лет), указывают на то, что формирование отложений пуйвинской свиты завершилось не раньше 900 млн лет назад. Незначительная мощность и фрагментарное развитие нижележащих пород ошизской толщи пуйвинской свиты при существенной доле в общей выборке цирконов с неопротерозойскими датировками (22 определения или 23%) дают основание для утверждения, что нижняя возрастная граница базальных отложений верхнего докембрия (пуйвинской свиты) на Приполярном Урале не выходит за пределы позднего рифея.

Проба (№ 4–28) для выделения цирконов из пород няровейской серии отобрана на берегу руч. Нярошор, левого притока р. Немурьеган, в 4 км от его устья (67.4489° с.ш., 66.4261° в.д.). Обнажение относится к нижней части минисейшорской свиты няровейской серии и сложено среднезернистыми хлорит-мусковит-альбит-кварцевыми сланцами. Цирконы в этой пробе в морфологическом отношении являются более разнообразными в сравнении с цирконами из пуйвинской свиты. Они разделяются по степени окатанности зерен, их форме, окраске и внутреннему строению. Хорошо окатанные цирконы составляют незначительную часть от общего количества цирконовой фракции в породе (около 5–10%). Это прозрачные светло-розовые и светло-желтые округлые зерна размером 0.1–0.2 мм с характерной шероховатой поверхностью. Основная часть зерен представлена относительно слабо окатанными цирконами светло-розовой окраски иногда с хорошо сохранившимися первичными морфологическими признаками. Циркон с максимальной датировкой имеет позднеархейский возраст – 2859 млн лет, с минимальной – позднерифейский – 660.1±5 млн лет. Основная выборка датировок, включающая 77 анализов (или 97%), охватывает интервал 2028.1–660.1 млн лет и имеет

полимодальный характер распределения с максимумами на уровнях 1700, 1230, и 680 млн лет. Минимальные значения датировок детритовых цирконов (660.1, 661.9, 666.5, 668.7 и 669.1 млн лет), указывают на то, что формирование отложений минисейшорской свиты завершилось не раньше 660 млн лет назад. Учитывая, что проба метапесчаника, из которой были датированы детритовые цирконы, отобрана из нижней части разреза минисейшорской свиты, а мощность нижележащих отложений верхнехарбейской свиты не превышает 500 м, можно с высокой степенью вероятности утверждать, что возрастной интервал накопления пород всего разреза няровейской серии ограничивается поздним рифеем.

Результаты проведенных геохронологических исследований, наряду с имеющимися данными о возрастных ограничениях верхнего докембрия разных районов северной части Урала, а также Тимана [Pystin et al., 2020 и ссылки в ней] дают основание считать, что здесь в отличие от южных районов Урала отсутствует нижнерифейские толщи и значительная часть (или весь объем) среднерифейского разреза. Верхнедокембрийский разрез начинается с отложений, пограничных по возрасту между средним и поздним рифеем, скорее всего, позднерифейских, что указывает на позднерифейское время раскрытия океанического бассейна и заложения Тиманской пассивной окраины. Это может быть объяснено высоким стоянием территории северо-востока Балтики в допозднерифейское время и нахождением ее во внутренней части фрагмента Колумбии, избежавшей деструкции вплоть до вхождения Балтики в Родинию.

Литература

Глубинное строение Тимано-Североуральского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 261 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII. Объяснительная записка / В.А. Душин, О.П. Сердюкова, А.А. Малюгин и др. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 384 с.

Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 2. С. 34–52.

Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Уралгеолком, 1993.

Pystin A. M., Pystina Yu. I., Ulyasheva N. S., Grakova O. V. U-Pb dating of detrital zircons from basal Post Paleoproterozoic metasediments in the Subpolar and Polar Urals: evidence for a Cryogenian, not Mesoproterozoic age, *International Geology Review*, 2020. V. 62. Is. 17. P. 2189-2202.

УДК 551.71/72

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ГИДРОСФЕРЫ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ САРМАТИИ

К.А. Савко¹, А.Б. Кузнецов², И.М. Васильева², М.Ю. Овчинникова¹

¹Воронежский университет, Воронеж, Россия, ksavko@geol.vsu.ru

²Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

В карбонатных породах Курского блока Сарматии зафиксированы свидетельства глобальных пертурбаций в атмосфере и гидросфере Земли. Доломиты роговской свиты формировались на пассивной континентальной окраине и характеризуются хондритовым Y/No отношением, отсутствием аномалий Ce*, значениями $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ типичными для морских карбонатов неоархея и раннего палеопротерозоя. Следовательно, их накопление происходило до великого окислительного события (GOE). Известняки тимской свиты контрастно отличаются отрицательными аномалиями Ce*, суперхондритовым Y/No отношением и аномально высокими значениями $\delta^{13}\text{C} = 10,4$ до $12,1$ ‰ V-PDB. Из этого следует, что карбонаты тимской свиты формировались после GOE во время события Ятулий-Ломагунди. Их Pb-Pb возраст 2233 ± 8 млн лет близок к его нижней границе.

Ключевые слова: Сарматия, палеопротерозой, карбонатные породы

ISOTOPE-GEOCHEMISTRY EVIDENCE FOR GLOBAL CHANGES IN THE HYDROSPHERE COMPOSITION IN PALEOPROTEROZOIC OF SARMATIA

K.A. Savko¹, A.B. Kuznetsov², I.M. Vasilyeva², M.Yu. Ovchinnikova¹

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia

²Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

In the carbonate rocks of the Kursk block of Sarmatia, evidence of global perturbations in the atmosphere and hydrosphere of the Earth has been recorded. Dolomites of the Rogovskaya Formation accumulated on the passive continental margin and are characterized by a chondrite Y/No ratio, the absence of Ce* anomalies, and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values typical of Neoarchean and Early Paleoproterozoic marine carbonates. Therefore, their accumulation took place before the GOE. Limestones of the Tim Formation are contrastingly distinguished by negative Ce* anomalies, superchondrite Y/No ratio, and anomalously high values of $\delta^{13}\text{C} = 10.4$ to 12.1 ‰ V-PDB. It follows from this that carbonates of the Tim Formation were formed after the GOE during the Yatuli-Lomagundi event. Their Pb-Pb age of 2233 ± 8 Ma is close to its lower boundary.

Key words: Sarmatia, Paleoproterozoic, carbonate rocks

С начала палеопротерозоя $\approx 2,5$ – $2,1$ млрд лет в истории Земли стали происходить важные изменения в окислительно-восстановительной обстановке атмосферы и гидросферы: рост концентрации свободного кислорода (великое окислительное событие - GOE), резкое увеличение содержания изотопа ^{13}C в карбонатных породах (Ломагундий-Ятулийское событие), глобальные оледенения [Schidlowski et al., 1976; Karhu, Holland, 1996]. Это время также известно как период затухания тектонических процессов и длительное развитие континентальной коры в обстановках пассивных окраин, когда накапливались мощные толщи железисто-кремнистых формаций (ЖКФ) и формировались карбонатные платформы [Condie et al., 2009]. Эти глобальные изменения проявлены и в кратоне Сарматия.

В Курско-Криворожском бассейне Сарматии доломиты роговской свиты перекрывают ЖКФ. Завершает разрез палеопротерозоя тимская свита, которая разделяется на две толщи – нижнюю, где преобладают углеродистые сланцы и присутствуют карбонаты, и верхнюю с широко развитыми metabasальтами с возрастом

≈ 2,1 млрд лет [Цыбуляев и др., 2021]. Все породы подверглись складчатости и метаморфизму зеленосланцевой фаций с возрастом ≈ 2,07 млрд лет.

В доломитах роговской свиты отсутствует отрицательная Ce аномалия ($Ce/Ce^* = 0.94-0.98$) и отмечается положительная аномалия Eu ($Eu/Eu^* = 1.3-2.0$). Значения отношения Y/No (26–34) близки к хондритовому ($Y/No=32$). Для известняков тимской свиты характерна отрицательная Ce аномалия ($Ce/Ce^* = 0.55-0.72$), отсутствие Eu аномалии ($Eu/Eu^* \approx 1$) (рис. 6) и суперхондритовое Y/No отношение (44–51). Таким образом, тимские известняки контрастно отличаются отрицательными Ce^* аномалиями, отсутствием Eu аномалий и суперхондритовым Y/No отношением.

Отсутствие отрицательной Ce^* аномалии в доломитах роговской свиты и наличие ее в тимских известняках предполагает их формирование в различных окислительных условиях: до и после накопления в атмосфере и гидросфере свободного кислорода (GOE).

Значения $\delta^{13}C$ изотопного состава углерода в доломитах роговской от 0,3 до 3,0 ‰ V-PDB. От них контрастно отличаются известняки тимской свиты аномально высокими значениями $\delta^{13}C$ от 6,0 ‰ в кровле разреза до 10,4–12,1 ‰ V-PDB в остальной его части. Такие высокие содержания тяжелого изотопа углерода четко указывают, что формирование карбонатных пород происходило во время Ломагунди-Ятулийского события в период 2,22–2,06 млрд лет назад.

Состав $\delta^{18}O$ в доломитах роговской свиты от (-5,1) до (-10,0) близко соответствует изотопному составу кислорода палеопротерозойских доломитов $(-8,1) \pm 2,5$ ‰ (Veizer et al., 1992). Почти такие же значения зафиксированы в известняках тимской свиты $\delta^{18}O = -9,5 - (-13,7)$ ‰ V-PDB. Поэтому карбонатные породы тимской и роговской свит являются типичными представителями морских карбонатов раннего палеопротерозоя.

Определение возраста накопления палеопротерозойских карбонатов в Курском блоке представляет сложную задачу из-за отсутствия в разрезах кислых вулканитов, содержащих минералы-геохронометры. В настоящее время известны два изотопно-геохронологических репера: (1) возраст внутриплитных риолитов 2,61 млрд лет [Savko et al., 2019], на коре выветривания которых залегают терригенные породы стойленской свиты, согласно сменяющиеся мощными ЖКФ коробковской свиты и (2) возраст базальтов тимской свиты 2,1 млрд лет [Цыбуляев и др., 2021]. Полмиллиарда лет – огромный интервал для развития палеопротерозойского осадочного бассейна, который требует детализации. Для этой цели для известняков тимской свиты была рассчитана Pb-Pb изохрона по 4 точкам, соответствующая возрасту 2233 ± 8 млн лет (СКВО = 0,43).

Исследования палеопротерозойских карбонатных отложений в Курском блоке позволили сделать следующие выводы: (1) карбонатные породы роговской свиты формировались на пассивной континентальной окраине. В них хондритовое Y/No отношение, отсутствуют отрицательные Ce_{SN} и проявлены положительные Eu_{SN} аномалии. Изотопные характеристики $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ отвечают типичным морским карбонатам неоархея и раннего палеопротерозоя и их накопление происходило до GOE. (2) Известняки тимской свиты контрастно отличаются от роговских карбонатов отрицательными аномалиями Ce^* , суперхондритовым Y/No отношением и аномально высокими значениями $\delta^{13}C = 10,4$ до 12,1 ‰ V-PDB. Из этого следует, что карбонаты тимской свиты формировались после GOE во время Ломагунди-Ятулийского события. Pb-Pb возраст 2233 ± 8 млн лет близок к его нижней границе.

Литература

Condie K.C., O'Neill C., Aster R. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth // Earth and Planet. Sci. Lett. 2009. V. 282. P. 294–298. doi:10.1016/j.epsl.2009.03.033

Karhu J.A., Holland H.D. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen // Geology. 1996. V. 24 (10). P. 867–870.



Savko K.A., Samsonov A.V., Kholina N.V., Larionov A.N., Zaitseva M.V., Korish E.H., Bazikov N.S., Terentiev R.A. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations// *Precambrian Research*. 2019. 322. P. 170–192. doi:10.1016/j.precamres.2019.01.006

Savko K.A., Samsonov A.V., Santosh M., Ovchinnikova M.Yu. Neoproterozoic-Palaeoproterozoic sedimentary basins in the Sarmatian Craton: global correlations and connections// *Journal of Geology*. 2021. v. 56. P. 4479-4498. doi: 10.1002/gj. 4185

Schidlowski M., Eichmann R., Junge C.E. Carbon isotope geochemistry of the Precambrian Lomagundi carbonate province, Rhodesia// *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1976. V. 40. P. 449–455.

Veizer J., Clayton R.N., Hinton R.W. Geochemistry of Precambrian carbonates: IV. Early Paleoproterozoic (2.25 ± 0.25) seawater // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. N 3. P. 875–885.

Цыбуляев С.В., Савко К.А., Самсонов А.В., Кориш Е.Х. Палеопротерозойские рифтогенные вулканы ОИВ- и MORB-типа Курского блока восточной Сарматии: петрология и геодинамика // *Петрология*. 2021. № 2. С. 136-171. doi: 10.31857/S0869590321020060



УДК 551.2

ГЕОДИНАМИКА РАСКОЛА ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА

2.1 МЛРД ЛЕТ НАЗАД

А.В. Самсонов¹, А.В. Степанова², Е.Б. Сальникова³, Ю.О. Ларионова¹, А.Н. Ларионов⁴

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, samsonovigem@mail.ru

²Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

³Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

В докладе будут обсуждаться петрологические характеристики базитового внутриплитного магматизма с возрастом 2.1 млрд лет на Карельском кратоне для расшифровки геодинамики раскола архейской континентальной литосферы и раскрытия Свекофеннского океана.

Ключевые слова: ранний докембрий, геодинамика, раскол континентов, плюмы, субдукция

GEODYNAMIC OF BREAKUP FOR WESTERN PART OF THE KARELIAN CRATON 2.1 GA AGO

A.V. Samsonov¹, A.V. Stepanova², E.B. Salnikova³, Yu.O. Larionova¹, A.N. Larionov⁴

¹Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia

²Institute of the Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

³Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

⁴Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

Petrological features for the 2.1 Ga basic within-plate magmatism in the Karelian Craton will be discussed in order to decipher the geodynamics of the breakup of the Archean continental lithosphere and the opening of the Svecofennian Ocean.

Keywords: Early Precambrian, geodynamics, continental breakup, plumes, subduction

Карельский кратон – тектонический осколок архейской континентальной литосферы, ограниченный тремя палеопротерозойскими орогенами: Центрально-Русским с юга, Лапландско-Кольским с северо-востока и Свекофеннским с запада [Bogdanova et al., 2016].

Согласно палеоконтинентальным реконструкциям, с конца архея Карельский кратон входил в состав суперкратона Сьюпериа, который был консолидирован около 2.7 млрд лет и начал распадаться около 2.45 млрд лет [Ernst, Bleeker, 2010; Pehrsson et al., 2013; Davey et al., 2022]. В этом суперкратоне до 2.1 млрд лет Карельский кратон с запада граничил с кратоном Херн, что обосновано комплексом данных [Ernst, Bleeker, 2010]: (1) сходством строения и состава разрезов палеопротерозойских вулканогенно-осадочных бассейнов; (2) присутствием на краях этих кратонов реликтов древней палеоархейской коры; (3) присутствием на территории этих кратонов роев мафических даек с возрастом около 2.1 млрд лет. Еще одним аргументом является присутствие на западном краю Карельского кратона пачки туффинов с возрастом 2.1 млрд лет и с характеристиками OIB [Perttunen, Hanski, 2003], геохимические аналоги которых в виде силлов и даек распространены на кратоне Херн [Aspler et al., 2002].

Раскол континентальной литосферы с разделением Карельского кратона и кратона Херн произошел около 2.1 млрд лет назад, о чем свидетельствует наличие на краях этих кратонов пассивных окраин этого возраста [Kohonen, 1995; Lahtinen et al., 2015; Ansdell et al., 2000; Najnal et al., 2005]. При этом основной магматизм с возрастом 2.1 млрд лет на этих двух смежных кратонах имел контрастные петрогенетические характеристики.

На Карельском кратоне и смежной Беломорской провинции представлены два типа базитов:

1. Дайки, лавы и силлы деплетированных толеитов MORB-типа, которые формировались за счет плавления малоглубинного астеносферного источника и поступали к поверхности в обстановке интенсивного утонения и растяжения архейской литосферы. Возраст даек толеитов MORB-типа на Карельском кратоне варьирует в интервале 2.14-2.10 млрд лет [Stepanova et al., 2014; Davey et al., 2022]

2. Дайки обогащенных толеитов, образованных при дифференциации и контаминации расплавов MORB-типа [Stepanova et al., 2014; 2022, Davey et al., 2022; Самсонов и др., 2023].

Смежный кратон Херн, напротив, вмещает силлы и дайки базитов OIB-типа с возрастом 2.11 млрд лет, которые указывают на плавление глубинного гранат-равновесного источника под мощной архейской литосферой [Aspler et al., 2002].

Синхронное формирование базитов с контрастными глубинами зарождения в смежных блоках указывает на существование в области их сочленения литосферной ступени, которая рассматривается как один из ключевых факторов разрыва литосферы в расчетных моделях [Burov et al., 2007; Koptev et al., 2015]. Такой ступенью могли служить литосферные кили палеоархейских блоков, цепочка которых среди неоархейской коры трассируется по западной окраине Карельского кратона [Hölttä et al., 2019].

Раскол литосферы Карельского кратона все исследователи связывают с подъемом глубинного плюма [Kohonen, 1995; Lahtinen et al., 2015]. В реконструкции плюма под суперкратоном Сьюпериа 2.1 млрд лет назад, кратоны Карельский и Херн располагались на периферии этого плюма, на значительном, более 1000 км, и примерно на равном удалении от его центра [Ernst, Bleeker, 2010; Davey et al., 2022]. Моделирование процессов зональности мантийных плюмов [Lavecchia et al., 2017] показывает, что при удалении от центра плюма термальная эрозия и уменьшение мощности перекрывающей литосферы снижается, и раскол происходит по ослабленным шовным зонам. На границе Карельского кратона и кратона Херн раскол мог происходить по зоне сочленения палео- и неоархейской коры.

Модель раскола литосферы в результате подъема мантийного плюма, однако, оставляет без ответа вопрос о механизме утонения и растяжения литосферы, который мог бы обеспечить присутствие базитов MORB-типа только на Карельском кратоне при их полном отсутствии на всех остальных кратонах, входивших в суперкратон Сьюпериа [Davey et al., 2022]. Ответ на этот вопрос возможен, если предположить, что раскол Карельского кратона был обеспечен не только с воздействием плюма, но вовлечением других факторов, например, субдукционного растяжения, которое также обсуждается как причина раскола континентов [Zhang et al., 2018; Loveschio et al., 2020]. Свидетельства субдукции в северо-восточном обрамлении Карельского кратона сохранились в палеопротерозойских метасадочных породах Лапландско-Кольского орогена, сформированных за счет разрушения островодужных построек с ювенильными характеристиками (T_{NdDM} от 2.24 до 2.42) и с возрастом циркона 2.2-2.0 млрд лет [Bridgwater et al., 2001].

Растяжение литосферы Карельского кратона в области влияния субдукционных процессов в Лапландско-Кольском океане в сочетании с воздействием мантийного плюма 2.1 млрд лет назад могло не только привести к расколу литосферного блока, но и к заложению ослабленных зон в литосфере, которым обеспечивали интенсивное растяжение и быстрый подъем астеносферных расплавов толеитов MORB-типа только на Карельском кратоне. Такой механизм может объяснить локальное присутствие на всей территории Карельского кратона базитов MORB-типа без повсеместного резкого утонения литосферы, как можно было бы ожидать в случае эрозии под влиянием плюма [Burov et al., 2007; Koptev et al., 2015; Lavecchia et al., 2017]. Сохранные участки мощной архейской литосферы Карельского кратона могли снизить скорость подъема мантийных расплавов, обеспечив условия для дифференциации расплавов в промежуточных камерах и контаминации деплетированных астеносферных магм коровым веществом. Эти процессы могли привести к образованию обогащенных толеитовых расплавов, которые также были широко представлены на Карельском кратоне 2.1 млрд лет назад.

Литература

- Самсонов А.В., Степанова А.В., Сальникова Е.Б., Ларионова Ю.О., Ларионов А.Н. Возраст и геодинамика раскола западной части Карельского кратона: данные по базитовому магматизму с возрастом 2.1 млрд лет // Петрология. 2023 (в печати).
- Ansdell, K., MacNeill, A., Delaney, G., Hamilton, M. Rifting and development of the Hearne Craton passive margin: age constraint from the Cook Lake area, Wollaston Domain, Trans-Hudson Orogen, Saskatchewan // In: GeoCanada 2000 Conference. 2000. Extended abstract. P. 777.
- Aspler L.B., Cousens B.L., Chiarenzelli J.R. Griffin gabbro sills (2.11 Ga), Hurwitz Basin, Nunavut, Canada: long-distance lateral transport of magmas in western Churchill Province crust // Precambrian Research. 2002. V. 117. P. 269-294
- Bogdanova, S.V., Gorbatshev, R., Garetsky, R.G. EUROPE| East European Craton // In: Scott, E. (Ed.). Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2016. Elsevier.
- Bridgwater D., Scott D.J., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Marker M., Bushmin S.A., Alexeyev N.L., Daly J.S. Age and provenance of early Precambrian metasedimentary rocks in the Lapland-Kola Belt, Russia: evidence from Pb and Nd isotopic data // Terra Nova. 2001. V. 13. P. 32-37
- Burov E., Guillou-Frottier L., d'Acremont E., Le Pourhiet L., Cloetingh S. Plume head-lithosphere interactions near intra-continental plate boundaries // Tectonophysics. 2007. V. 434. P. 15-38.
- Davey S.C., Bleeker W., Kamo S.L., Ernst R.E., Cousens B.L., Vuollo J., Huhma H. Evidence for A Single Large Igneous Province at 2.11 Ga Across Supercraton Superia // J. Petrology. 2022. V.63. P. 1-36
- Ernst, R.E., Bleeker, W. Large igneous provinces (LIPs), giant dyke swarms, and mantle plumes: significance for breakup events within Canada and adjacent regions from 2.5 Ga to present // Canadian Journal of Earth Sciences. 2010. V. 47. P. 695-739.
- Hajnal Z., Lewry J., White D., Ashton K., Clowes R., Stauffer M., Gyorfi I., Takacs E. The Sask Craton and Hearne Province margin: seismic reflection studies in the western Trans-Hudson Orogen // Canadian Journal of Earth Sciences. 2005. V. 42. P. 403-419.
- Hölttä P., Heilimo E., Huhma H., Kontinen A., Lauri L., Slabunov A. Paleoproterozoic Rocks in the Fennoscandian Shield // In: Kranendonk M.J.V., Bennett V.C., Hoffmann J.E. (Eds) Earth's Oldest Rocks. Second Edition. 2019. Chapter 32. P. 819 – 835
- Kohonen J. From continental rifting to collisional crustal shortening – Paleoproterozoic Kaleva metasediments of the Hoytinen area in North Karelia, Finland // Geol. Surv. Finland Bul. 1995. V. 380. 82 p.
- Koptev A., Calais E., Burov E., Leroy S., Gerya T. Dual continental rift systems generated by plume-lithosphere interaction // Nature Geoscience. 2015. V. 8. P. 388-392.
- Lahtinen, R., Huhma, H., Lahaye, Y., Kousa, J., Luukas, J. Archean-Proterozoic collision boundary in central Fennoscandia: revisited // Precambrian Research. 2015. V. 261. P. 127-165.
- Lavecchia A., Thieulot C., Beekman F., Cloetingh S., Clark S. Lithosphere erosion and continental breakup: Interaction of extension, plume upwelling and melting // Earth and Planetary Science Letters. 2017. V. 467. P. 89-98
- Lovecchio J.P., Rohais S., Joseph P., Bolatti N.D., Ramos V.A. Mesozoic rifting evolution of SW Gondwana: A poly-phased, subduction related, extensional history responsible for basin formation along the Argentinean Atlantic margin // Earth-Science Reviews. 2020. V. 203. 103138
- Pehrsson S.J., Berman R.G., Eglinton B., Rainbird R. Two Neoproterozoic supercontinents revisited: The case for a Rae family of cratons // Precambrian Research. 2013. V. 232. P. 27- 43
- Stepanova A.V., Samsonov A.V., Salnikova E.B., Puchtel I.S., Larionova Yu.O., Larionov A.N., Stepanov V.S., Shapovalov Y.B., Egorova S.V. Paleoproterozoic continental MORB-type tholeiites in the Karelian craton: petrology, geochronology and tectonic setting // J.Petrology. 2014. V. 55. P. 1719-1751.
- Zhang N, Dang Z, Huang C, Li Z.X. The dominant driving force for supercontinent breakup: Plume push or subduction retreat? // Geosci Front. 2018. V. 9. P. 997-1007



УДК 552.3

**КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОЙ ИСТОРИИ
ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ: РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ, ПРИЧИНЫ, СЛЕДСТВИЯ**

С.А. Светов, С.Ю. Чаженина, А.В. Степанова

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, ssvetov@krc.karelia.ru

В докладе будут представлены новые данные по геологии и петрологии базальтов суйсарского магматического комплекса палеопротерозойской Онежской структуры.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит, Онежская структура, палеопротерозой, вулканизм

**CATASTROPHIC ERUPTIONS IN THE PALEOPROTEROZOIC OF THE
ONEGA BASIN: EVENTS RECONSTRUCTIONS, CAUSES AND CONSEQUENCES**

S.A. Svetov, S. Yu. Chazhengina, A.V. Stepanova

Institute of the Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

New geological and petrological data for Suissarian basalts in the Paleoproterozoic Onega basin will be presented.

Key words: Fennoscandian Shield; Onega basin, Paleoproterozoic, volcanism

Современное развитие Земли во многом определяется механизмами, активно функционирующими начиная с раннего докембрия, поэтому изучение триггеров катастрофических вулканических извержений в вулканических системах разных возрастов и разной тектонической позиции может служить основой для понимания и прогнозирования вулканической деятельности планеты в будущем. Одним из наиболее ярких событий в раннедокембрийской истории развития восточной Фенноскандии является формирование обширных платобазальтовых провинций заонежского и суйсарского комплексов палеопротерозоя около 2 млрд лет назад. Суйсарский вулканический комплекс, реликты которого наиболее хорошо сохранились в Онежской структуре Карельского кратона, объединяет лавовые толщи, сложенные пикробазальтами, базальтами и андезитобазальтами, а также горизонты пирокластических пород, сложенные агломератовым туфами и пеплами. Мощность пород суйсарского комплекса в разрезах Онежской структуры составляет до 700 метров, свидетельствуя о масштабных вулканических излияниях.

Использование методов палеовулканологического анализа позволило реконструировать условия формирования палеовулканических центров суйсарского комплекса, восстановить стадийность, оценить объемы лав и пирокластического материала. Полученные оценки показывают, что объем эруптивных выбросов на разных этапах составлял 10-100 км³, обеспечивая большую область воздействия пирокластического материала на территорию Карельского кратона, что свидетельствует о высокой эксплозивности извержений и позволяют относить их к плининанско-пелейскому типу. Полученные данные показывают, что около 2 млрд лет назад в Онежской структуре произошла серия катастрофических извержений с индексом эксплозивности VEI 7, превосходящих по мощности и объемам вулканического материала все извержения последних 100 тысяч лет.

Детальные минералогические, геохимические и петрологические исследования вариолитовых лав позволяют реконструировать коровую эволюцию первичных расплавов суйсарского вулканизма. Полученные результаты свидетельствуют о существенном вкладе в эволюцию первичных мантийных расплавов не только процессов фракционной кристаллизации в закрытых магматических камерах, но и контаминации породами галитовых и карбонатных толщ в промежуточных камерах, а также активное участие поверхностных вод в фреато-магматических системах. Вулканический цикл в суйсарском комплексе завершается формированием поздней агатовой и кварц-карбонатной минерализации с широким распространением сульфидных минеральных парагенезисов, что может служить индикатором его высокого рудного потенциала.

Результаты исследований подтверждают необходимость детального изучения палеовулканических систем палеопротерозоя в связи с возможностью получения новых данных о процессах магнообразования, вулканической деятельности, постмагматического и гидротремального рудообразования и их эволюции в истории Земли.

УДК 552.48

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ДАТИРОВАНИЯ ЭКЛОГИТОВ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

С. Г. Скублов^{1,2}, А. В. Березин^{1,3}, Л. И. Салимгараева^{1,2}

¹Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, skublov@yandex.ru

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,

Проведен объективный критический анализ всех точек зрения на проблему времени эклогитового метаморфизма в пределах Беломорского подвижного пояса (БПП) и аргументов, лежащих в их основе. Авторская трактовка возраста эклогитового метаморфизма в пределах БПП основана на комплексе независимых изотопно-геохимических методов датирования – локальном U-Pb методе по гетерогенным цирконам с магматическими ядрами и эклогитовыми каймами, Lu-Hf и Sm-Nd методам по породообразующим минералам эклогитового парагенезиса – гранату и омфациту. Все три метода независимо друг от друга определяют возраст эклогитового метаморфизма как свекофеннский, с одним и тем же значением – около 1900 млн лет.

Ключевые слова: эклогиты, докембрий, Беломорский подвижный пояс, петрохронология, изотопный возраст, циркон, U-Pb метод, Sm-Nd метод, Lu-Hf метод

THE RESULTS OF THE COMPLEX DATING OF THE ECOGITES OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT

S. G. Skublov^{1,2}, A. V. Berezin^{1,3}, L. I. Salimgaraeva^{1,2}

¹Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

³Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Generalized overview of all points of view on the timing of eclogite metamorphism of Belomorian Mobile Belt (BMB) with critical analysis of underlying arguments was made. The author's interpretation of the age of eclogite metamorphism within the BMB is based on a combination of independent isotope-geochemical dating methods: local U-Pb dating of heterogeneous zircons with magmatic cores and eclogite rims, Lu-Hf and Sm-Nd dating of rock-forming minerals of eclogite paragenesis (garnet and omphacite). All three methods independently determine the age of eclogitic metamorphism as Svecofennian, with the same value of about 1900 Ma.

Key words: eclogites, Precambrian, Belomorian Mobile Belt, petrochronology, isotopic age, zircon, U-Pb method, Sm-Nd method, Lu-Hf method

Эклогиты Беломорского подвижного пояса являются ключевым объектом для геодинамических реконструкций не только БПП, но и Фенноскандинавского щита в целом. Одним из главных вопросов для эклогитов БПП является установление времени их формирования. Интерпретация возраста эклогитов БПП как архейского позволила ряду исследователей распространить на этот сегмент архейской коры геодинамические механизмы тектоники плит современного типа. В настоящее время геохронологические данные, полученные по эклогитам БПП в целом, интерпретируются по-разному.

Установленные в работе [Скублов и др., 2012] закономерности распределения редких и редкоземельных элементов в цирконе из эклогитов (аномально пониженное содержание Th и величина Th/U отношения, значительно пониженное содержание всего спектра REE и, особенно, LREE, пониженное содержание Y, U, P и повышенное – Hf) универсальны, они не зависят от типа породы (метабазиты, метаультрабазиты, гнейсы) и

величины давления (эклогиты высокого и сверхвысокого давления). Комплексное использование этих признаков позволяет уверенно отличать эклогитовый циркон от циркона магматического генезиса и метаморфического циркона, не связанного с высокобарическим метаморфизмом. Для эклогитов БПП (на примере районов Салмы, Гридино и Керетского архипелага) установлено, что центральные части (ядра) циркона из эклогитов-метагаббро с варьирующим возрастом от 2.2 до 2.8-2.9 Ga являются магматическими, а их внешние метаморфические каймы с возрастом около 1.9 Ga по редкоэлементному составу соответствуют типовым эклогитовым цирконам.

Для циркона из пегматитов, секущих будину эклогитов на острове Столбиха (район с. Гридино) было установлено, что возраст 1890 ± 2 Ma для основной популяции циркона является возрастом внедрения пегматитов. Это значение возраста служит верхней границей для эклогитов ВМВ с возрастом около 1900 Ma [Skublov et al., 2020]. Датировка 2743 ± 10 Ma, полученная по цирконам с хорошо проявленной секториальной (мозаичной) зональностью, интерпретируется нами, с учетом распределения в них редких элементов, как возраст гранулитового метаморфизма, ранее установленного в различных районах БПП. Аналогично следует интерпретировать возраст ядер цирконов из будины эклогитов, которую сечет пегматитовая жила (2702 ± 25 Ma) [Скублов и др., 2012].

Для проверки правильности вывода о свекофеннском времени эклогитового метаморфизма в БПП, установленного по цирконам с учетом их геохимических особенностей [Скублов и др., 2011, 2012], было проведено Lu-Hf датирование для эклогитов северо-западной части БПП (месторождение Куру-Ваара) и района Гридино по гранату, клинопироксену и породе в целом, результаты которого также показали возраст около 1.9 млрд лет. Было показано, что гранаты обладают проградной зональностью с пиком содержания Lu в центре зерен [Melnik et al., 2021]. Соответственно, Lu-Hf возраст гранатов отражает время кристаллизации прежде всего центральной части зерен. При этом, Sm-Nd изохронный возраст (Grt+Cpx+WR) эклогитов северо-западной части БПП также имеет значение около 1.9 млрд лет. Значение возраста гранатов по Sm-Nd изотопной системе отражает скорее возраст основного объема зерен (включая краевые части), учитывая характер зональности гранатов по Sm и Nd [Melnik et al., 2021].

Для проверки равновесия зерен и оторочек циркона с возрастом ~ 1.9 млрд лет и граната эклогитов было проведено локальное определение изотопного состава кислорода методом SIMS [Melnik et al., 2021]. Результаты исследования в минералах из будин эклогитов Куру-Ваары (с магматическим протолитом архейского возраста) показали, что изотопный состав кислорода в гранате ($\delta^{18}\text{O} = 4.0\text{-}5.0\text{‰}$) находится в равновесии с составом палеопротерозойского (около 1.9 млрд лет) циркона ($\delta^{18}\text{O} = 4.5\text{-}5.4\text{‰}$); значения же $\delta^{18}\text{O}$ в магматических доменах циркона архейского возраста (примерно 2.88 млрд лет) значительно выше (5.1-5.9‰) и неравновесны с таковыми в гранате.

Таким образом, по нашим данным, эклогиты БПП являются одними из самых древних высокобарических пород с достоверно установленным возрастом метаморфизма около 1.9 млрд лет при различном возрасте магматического протолита в интервале от 2.2 до 2.9 млрд лет.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГД РАН FMUW-2022-0005.

Литература.

Скублов С. Г., Березин А. В., Бережная Н. Г. Общие закономерности состава цирконов из эклогитов по редким элементам применительно к проблеме возраста эклогитов Беломорского подвижного пояса // Петрология. 2012. Т. 20. № 5. С. 470-494.



Скублов С. Г., Березин А. В., Мельник А. Е. Палеопротерозойские эклогиты северо-западной части Беломорского подвижного пояса, район Салмы: состав и изотопно-геохимическая характеристика минералов, возраст метаморфизма // Петрология. 2011. Т. 19. № 5. С. 493-519.

Скублов С. Г., Березин А. В., Мельник А. Е., Астафьев Б. Ю., Воинова О. А., Алексеев В. И. Возраст протолита эклогитов южной части Пезжострова, Беломорский пояс: протолит метабазитов как индикатор времени эклогитизации // Петрология. 2016. Т. 24. № 6. С. 640-653. doi: 10.7868/S0869590316040051

Melnik A. E., Skublov S. G., Rubatto D., Müller D., Li X. H., Li Q. L., Berezin A. V., Herwartz D., Machevariani M. M. Garnet and zircon geochronology of the Paleoproterozoic Kuru-Vaara eclogites, northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield // Precambrian Research. 2021. 353. 106014. doi: 10.1016/j.precamres.2020.106014

Skublov S. G., Berezin A. V., Li X. H., Li Q. L., Salimgaraeva L. I., Travin V. V., Rezvukhin D. I. Zircons from a pegmatite cutting eclogite (Gridino, Belomorian Mobile Belt): U-Pb-O and trace element constraints on eclogite metamorphism and fluid activity // Geosciences. 2020. 10(5). P. 197-218. doi: 10.3390/geosciences10050197

Skublov S. G., Berezin A. V., Salimgaraeva L. I. Comment on Volodichev et al. Archean Zircons with Omphacite Inclusions from Eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The First Finding. Minerals 2021, 11, 1029 // Minerals. 2022. V. 12. № 2. 141. doi: 10.3390/min12020141



УДК 55 (551.21)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ АРХЕЙСКОГО И ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ОРОГЕНОВ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

А.И. Слабунов

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, slabunov@krc.karelia.ru

Проведен сравнительный анализ глубинного строения, вещественного состава главных структурно-вещественных комплексов, истории формирования мезо-неоархейского Карело-Беломорско-Кольского и палеопротерозойских Лапландско-Кольского и Свекофеннского орогенов Фенноскандинавского щита. Отмечается, что мощность литосферы в пределах первого (архейского) из них составляет 200-250 км, тогда во вторых 150- 200 км, при этом в архитектуре земной коры обеих из них ведущую роль имеют покровно-надвиговые структуры. В периоды 3.0-2.6 и 2.0-1.65 млрд лет в каждом из них фиксируется проявления спрединга, субдукции, коллизии, мантийных плюмов и общая последовательность событий сопоставима с фанерозойскими. Продолжительность становления рассмотренных архейского и палеопротерозойского орогенов также сходна – около 350 млн лет. Это свидетельствует о том, что геодинамическая природа орогенов архея и палеопротерозоя не отличается между собой и от современных структур этого типа.

Ключевые слова: ороген, архей, палеопротерозой, Свекофеннский ороген, Лапландско-Кольский ороген, Карельский кратон, Фенноскандинавский щит

ARCHAEOAN AND PALEOPROTEROZOIC OROGENS OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD: COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHITECTURE AND CRUSTAL EVOLUTION

A.I. Slabunov

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

Comparative analysis of the structure and mineralogical composition of major structural-mineralogical complexes and the evolution of the Meso-Neoproterozoic Karelian-Belomorian-Kola and the Paleoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian orogen of the Fennoscandian Shield was performed. It is noted that the lithosphere of the former (Archean) is 200-250 km thick, while the latter is 150- 200 km thick. Overlapping-overthrust structures contribute mostly to the earth's crust architecture of both orogens. 3.0-2.6 and 2.0-1.65 Ga ago, each of them displayed spreading, subduction, collision and mantle plumes, and the general sequence of these events is comparable to Phanerozoic. The formation of both the Archean and Paleoproterozoic orogens took about 350 Ma. This shows that the Archean and Paleoproterozoic orogens do not differ in geodynamic nature from each other and from modern structures of this type.

Keywords: orogen, Archean, Paleoproterozoic, Svecofennian orogen, Lapland-Kola orogen, Karelian Craton, Fennoscandian Shield

Восточная часть Фенноскандинавского щита включает два архейских кратона (Карельский и Мурманский), разделенных палеопротерозойским коллизионным Лапландско-Кольским орогеном, к Карельскому кратону на западе примыкает палеопротерозойский аккреционный Свекофеннский ороген [Балаганский и др., 2016; Слабунов и др., 2021].

На примере Фенноскандинавского щита можно сопоставить строение (архитектуру), историю формирования, особенности состава важнейших комплексов - индикаторов геодинамических обстановок архейских (3.0-2.6 млрд лет - Ga) и палеопротерозойских (2.0-1.65 Ga) орогенов.

Важно учитывать, что анализируемые структуры Фенноскандинавского щита в рамках суперконтинентальной цикличности были элементами более крупных геологических образований. Архейское ядро щита – это фрагмент крупного складчатого (орогенического) пояса, сформировавшегося в ходе

становления суперконтинентов Кенорленд [Lubnina, Slabunov, 2011], а палеопротерозойские Свекофеннский и Лапландско-Кольский орогены - элементы более крупной структуры в составе суперконтинента Колумбия/Нуна [Lahtinen et al. 2008].

Мощность литосферы в пределах архейской части щита оценивается в 200-250 км [Meshcheryakova et al., 2022], тогда как в пределах палеопротерозойской - в 150- 200 км [Artemieva, 2011], при этом в архитектуре земной коры обеих из них ведущую роль играют покровно-надвиговые структуры [Глубинное строение..., 2010, Слабунов и др., 2010].

Информация об архейском орогене Фенноскандинавского щита содержится в геологических образованиях Карельской, Беломорской, Кольской и Мурманской провинций, и исходя из этого, его можно именовать Карельско-Беломорско-Кольский [Слабунов и др., 2020]. Становление ювенильной континентальной земной коры в этом орогене начинается около 3.0-2.95 Ga в обрамлении древних (3.5-3.2 Ga) блоков континентальной литосферы [Слабунов и др., 2020, 2021 и ссылки там]. В составе орогена известны фрагменты мезоархейской (3.0-2.8 Ga) океанической коры типа океанических плато (базальт-коматиитовые ассоциации), супрасубдукционных офиолитов (Серякский, Ириногорский) [Слабунов и др., 2021 и ссылки там]. Выделяется четыре главных субдукционно-аккреционных эпизода становления континентальной коры: 2.99-2.94; 2.9-2.85; 2.82-2.78; 2.75-2.72 Ga, в ходе которых формируются отдельные террейны [Слабунов и др., 2020]. Таким образом, продолжительность каждого эпизода около 30-50 млн лет. Период 2.71-2.68 Ga знаменуется коллизией Карельского и Кольско-Мурманского блоков (супертеррейнов) с образованием Беломорского коллизионного пояса [Слабунов и др., 2021] и его последующим коллапсом, завершившимся около 2.66 Ga. В западной части орогена синхронно с коллизией формируются осадки типа вакки (комплекс Нурмес). Таким образом, общая продолжительность формирования архейского орогена – 340 млн лет (3.00-2.66 Ga), продолжительность отдельных субдукционно-аккреционных эпизодов – 30-50 млн лет. При формировании орогена реконструируются проявления следующих геодинамических процессов: спрединг, субдукция, коллизия, мантийные плюмы.

Палеопротерозойские Лапландско-Кольский (2.0-1.89 Ga) и Свекофеннский (1.95-1.65 Ga) орогены, хотя и развиваются независимо друг от друга, но являются составляющими единой крупной системы орогенов в составе суперконтинента Колумбия/Нуна [Балаганский и др., 2016; Lahtinen et al., 2008]. Первый из них – это коллизионный ороген [Балаганский и др., 2016, Lahtinen et al. 2008 и ссылки там], а второй – аккреционный [Балтыбаев, 2013; Nironen, 2017]. Формирование Лапландско-Кольского коллизионного орогена начинается около 2.0 Ga с раскола древней континентальной коры и формирования океана красноморского типа. Период 1.96-1.92 Ga – это раннеорогенная стадия его развития, когда происходит образование новой (ювенильной) континентальной коры орогена в процессе субдукции. Период 1.93-1.90 (1.89) Ga – это коллизионная стадия, сопровождающаяся надвиговой тектоникой [Lahtinen, Nuhma, 2019 и ссылки там], утолщением коры и метаморфизмом пород в условиях гранулитовой фации повышенных давлений и температуры, а также эклогитовой [Слабунов и др., 2021 и ссылки там]. В период 1.89-1.82 Ga происходят разрушение орогена, эксгумация пород нижней и средней коры.

Формированию Свекофенского аккреционного орогена также предшествовало растяжение края континентальной коры древнего континента (образовавшегося на фундаменте архейского Карельского орогена) и формирование в период 2.0-1.95 Ga новой океанической литосферы (ее фрагменты сохранились в виде офиолитов Йормуа, Оутокумпу, Нетто). В период 1.92-1.65 Ga происходит формирование новой континентальной коры в процессе субдукции, ее амальгамация и последующей аккреция с архейском кратоном. Рост коры отмечается в ходе по крайней мере четырех субдукционно-аккреционных (коллизионных) событий: 1.92-1.89 Ga (сава-лапландская орогенция), 1.87-1.84 Ga (феннийская), 1.83-1.80 Ga (свекобалтийская) и 1.8-1.65 Ga (формирование Транскандинавского магматического пояса) [Балтыбаев, 2013, Lahtinen et al. 2008; Nironen, 2017]. Прерывистый характер становления континентальной коры Свекофенского орогена ярко

подчеркивается пространственно-временной асимметрией в проявлении высокотемпературного / умеренно-низкобарического метаморфизма: раннесвекофенского (1.89-1.87 Ga) во внешней (северной) зоне, а позднесвекофенского (1.83-1.79 Ga) во внутренней (южной) зоне [Балтыбаев, 2013].

Общая продолжительность становления палеопротерозойского Лапландско-Кольско-Свекофенского орогена 350 млн лет (2.00-1.65 Ga), хотя наиболее активные его фазы сконцентрированы в узких (40 млн лет) интервалах 1.96-1.92, 1.93-1.89 Ga.

Сравнительный анализ архитектуры земной коры, вещественного состава главных структурно-вещественных комплексов, истории формирования мезо-неоархейского и палеопротерозойского аккреционно-коллизийных орогенических поясов (на примере Карело-Беломорско-Кольского, Лапландско-Кольско и Свекофенского орогенов Фенноскандинавского щита) показывает, что геологические структуры данного класса за период 3.0-1.65 Ga не претерпели кардинальных изменений в закономерностях и основных геодинамических механизмов становления. В это время уже отмечаются проявления спрединга, субдукции, коллизии, мантийных плюмов. Продолжительность становления рассмотренных архейского и палеопротерозойского орогенов также сходна – около 350 млн лет.

Таким образом, геодинамические механизмы были сходны как для архейских, так и для палеопротерозойских орогенов. Однако структуры отличаются мощностью литосферы. Этот феномен может быть связан с тем, что древняя (архейская) океаническая литосфера была более мощной и это приводило к формированию в ходе субдукции более мощной континентальной литосферы. При этом механизмы тектоники литосферных плит в мезоархее уже на Земле действовали.

Благодарности и источник финансирования. Работа является вкладом в исследования по теме АААА-А18-118020290085-4.

Литература

Балаганский В.В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофенский орогены (Балтийский щит) // ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С.5–11.

Балтыбаев Ш. К. Свекофенский ороген Фенноскандинавского щита: вещественно-изотопная зональность и ее тектоническая интерпретация // Геотектоника. 2013. № 6. С.44–59.

Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. Том 1. А.Ф. Морозов (ред.). М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2010. 408 с.

Слабунов А.И. Архейские и палеопротерозойские орогены Фенноскандинавского щита и геодинамика ранней Земли // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Том 2. Материалы ЛП Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2020. С. 299-302.

Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика, 2021, т. 62, № 5, с. 648–675 DOI: 10.15372/GiG2021116 (Slabunov, A.I., Balagansky, V.V., Shchipansky A.A. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the tectonic setting of eclogites // Russian Geology and Geophysics, 2021, vol. 62, No 5, pp. 525–546 doi:10.2113/RGG20204266)

Слабунов А.И., Шаров Н.В., Исанина Э.В и др. Сейсмотомографическая модель земной коры по профилю ГСЗ – ОГТ «Суша-Море» Калевала-Кемь-горло Белого моря / Ред. Ю.Г. Леонов // Строение и история развития литосферы. Российские исследования по программе МПГ 2007/2008. Том 4. М.: Paulsen, 2010. С. 291–308.

Artemieva I. The lithosphere. An Interdisciplinary Approach. Cambridge University Press. 2011, 794 p.



Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen // *Precambrian Research*. 2019. V. 330. P.1–19.

Lahtinen R., Garde A., Melezhik V.A. Paleoproterozoic evolution of Fennoscandia and Greenland // *Episodes*. 2008. V. 31, № 1. P.20–28.

Lubnina N.V., Slabunov A.I. Reconstruction of the Kenorland Supercontinent in the Neoproterozoic Based on Paleomagnetic and Geological Data // *Moscow University Geology Bulletin*. 2011. V. 66, № 4. P.242–249.

Nironen M. Guide to the Geological Map of Finland – Bedrock 1:1 000 000 // *Bedrock of Finland at the scale 1:1 000 000 - Major stratigraphic units, metamorphism and tectonic evolution. Special paper 60.* Nironen M. (Ed.). GSF, 2017. P. 41–76.

Meshcheryakova A., Slabunov A.I., Vaganova N., Rychanchik M. Architecture of the subcontinental lithospheric mantle of the Archean segment of the Fennoscandian Shield: analysis of seismic data // *Tectonophysics*, 2022 (in press)

УДК 55 (550.4)

**ПОЛИХРОННАЯ ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
НЕОАРХЕЙСКИХ ПОЛОСЧАТЫХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ
ГЛАВНОЙ РУДНОЙ ТОЛЩИ КОСТОМУКШСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА:
ВОЗРАСТ ЦИРКОНОВ И АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ**

А.И. Слабунов, А.В. Кервинен, Н.С. Нестерова, А.В. Егоров, О.А. Максимов, П.В. Медведев

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, slabunov@krc.karelia.ru

В полосчатых железистых кварцитах (BIF) неоархейской (2.76-2.74 млрд лет) костомукшской свиты Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона установлены следующие акцессорные минералы: циркон, апатит, монацит, барит. Цирконы из BIF содержат магматогенные ядра с возрастными 2.9-2.8 млрд лет, что указывает на наличие в областях сноса мезоархейских пород. Метаморфогенные цирконы имеют возрасты 2.73, 2.64 и 1.86 млрд лет, и маркируют полиметаморфическую историю формирования.

Ключевые слова: Полосчатые железистые кварциты, циркон, барит, апатит, монацит, Костомукшский зеленокаменный пояс, Карельский кратон

**POLYCHRONOUS EVOLUTION OF NEOARCHEAN BANDED IRON FORMATION IN
THE MAIN ORE SEQUENCE OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT:
THE AGE OF ZIRCONS AND ACCESSORY MINERALS**

A.I. Slabunov, A.V. Kervinen, N.S. Nesterova, A.V. Egorov, O.A. Maksimov, P.V. Medvedev

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

The banded iron formation (BIF) of the Neoproterozoic (2.76-2.74 Ga) Kostomuksha Formation of the Kostomuksha greenstone belt of the Karelian Craton was shown to contain the following accessory minerals: zircon, apatite, monazite and barite. Zircons from BIF have 2.9-2.8 Ga magmatic cores indicating the presence of Mesoarchean rocks in source areas. Metamorphic zircons were dated at 2.73, 2.64 and 1.86 Ga. They mark the polydeformational evolution.

Keywords: banded iron formation, zircon, barite, apatite, monazite, Kostomuksha greenstone belt, Karelian Craton

Полосчатые железистые кварциты (banded iron formation – BIF) являются особым типом метаморфизованных осадочных пород, формирование которых происходило только в докембрии [Bekker et al., 2010]. Они часто входят в состав зеленокаменных комплексов и иногда формируют крупные залежи, являющиеся рудой. Так полосчатые железистые кварциты костомукшской свиты гимольской серии Костомукшского зеленокаменного пояса, расположенного в центральной части Карельского кратона, формируют крупнейшее на северо-западе России месторождение железных руд. Данная статья посвящена рассмотрению первых результатов изучения акцессорных минералов, в том числе цирконов, выделенных из BIF главной железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса, что позволяет более корректно восстановить историю становления рудной толщи.

Карельский кратон относится к числу классических структур этого типа и сложен преимущественно архейскими гранитоидами и зеленокаменными (в меньшей степени парагнейсовыми) комплексами [Куликов и др., 2017; Slabunov et al., 2006]. Последние формируют зеленокаменные пояса и представляют собой относительно узкие линейные структуры, окруженные гранитоидами. Зеленокаменные комплексы – это совокупность, как правило, относительно слабо или умеренно метаморфизованных вулканогенных и осадочных (в том числе, BIF) пород.

Костомукшский зеленокаменный пояс входит в состав террейна Кианта Западно-Карельской субпровинции Карельского кратона [Slabunov et al., 2006]. Он представляет собой относительно небольшую

субмеридиональную удлиненную структуру, (по простиранию прослеживается на 25 км, при ширине 4.5-7 км) погружающуюся в целом на восток и прослеживается на глубину до 6.5 км [Кожевников и др., 2006; Самсонов и др., 2001; Горьковец, Шаров, 2015].

Гимольская серия слагает восточный борт зеленокаменного пояса и представлена метаморфизованными песчано-глинистыми осадками флишевого типа. В основании толщи выделяются конгломераты (суккозерская свита), в нижней части толщи велика доля ВIF (костомукшская свита), а в верхней резко преобладают безрудные граувакки (сурлампинская свита). Формирование железорудной осадочной толщи (гимольской серии) в Костомукшском зеленокаменном поясе происходило синхронно с кислым вулканизмом, возраст которого оценивается в 2.76-2.74 млрд лет [Слабунов и др., 2021], в субдукционной геодинамической обстановке [Slabunov et al., 2020 и ссылки там].

Железорудная толща (костомукшская свита гимольской серии), изученная авторами в Центральном и Корпангском карьерах Костомукшского месторождения, сечется неоархейскими (2707 ± 31 и 2675 ± 9 млн лет, соответственно) гранит-порфирами и гранитами (шурловарский массив).

Гранитоиды тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации из обрамления пояса не являются фундаментом для зеленокаменного комплекса, так как их возраст оценивается в 2779 ± 11 млн лет [Бибикова и др., 2005], т.е. моложе вулканитов контоксской серии. Вместе с тем, эти ТТГ древнее осадков железорудной толщи (гимольской серии). Кроме того, в районе установлены гранитоиды, которые секут зеленокаменный комплекс. Это граниты Ниемиярвинского массива (2720 ± 20 млн лет) и санукитоиды массивов Таловейс ($2718 \pm 6 - 2707 \pm 9$ млн лет [Бибикова и др., 2005]).

Гранит-зеленокаменный комплекс рассматриваемого района сечется палеопротерозойскими (с возрастом около 2.4 млрд лет) дайками долеритов. Наиболее позднее проявление эндогенной активности здесь – неопротерозойский (около 1.2 млрд лет) щелочно-ультраосновной магматизм (лампроиты, кимберлиты) [Горьковец, Шаров, 2015].

Акцессорные минералы

Среди акцессорных минералов в ВIF костомукшской свиты установлены монацит (рис. 1а, б), барит (рис. 1в, г), апатит (рис. 1б) и цирконы (рис. 2).

Монацит образует мелкие (15-20 мкм) хорошо ограненные зерна (рис. 1), не имеет признаков окатанности и является метаморфогенным. Его химический состав отвечает фтор-апатиту.

Барит встречается как в виде небольших призматических зерен (рис. 1а), концентрирующихся в прослоях кварца, так и в виде амёбовидных агрегатов среди зерен магнетита (рис. 1в). Он, по-видимому, также образуется в ходе метаморфических преобразований под влиянием, например, неоархейских гранитоидов.

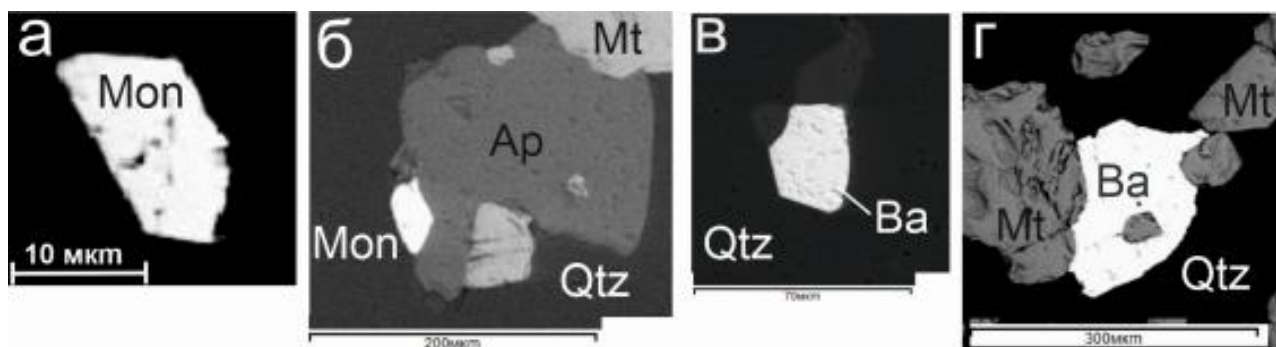


Рис. 1. Изображения в отраженных электронах минеральных ассоциаций ВIF с монацитом (а, б), апатитом (б) и баритом (в, г). Ap – апатит, Ba – барит, Qtz – кварц, Mon – монацит, Mt – магнетит.

Fig. 1. Back-scatter electron images of mineral BIF associations with monazite (a, b), apatite (b) and barite (c, d). Ap – apatite, Ba – barite, Qtz – quartz, Mon – monazite, Mt – magnetite.

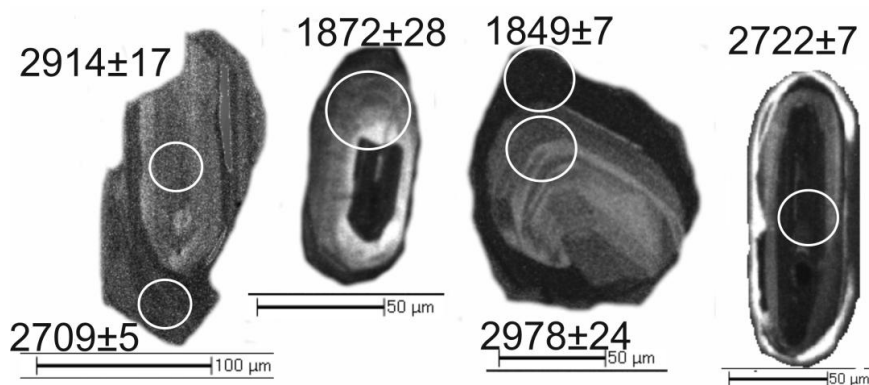


Рис. 2. Катодоллюминесцентные изображения цирконов из ВIF Костомукшской свиты. Белые круги - аналитические точки, цифры около них - значения ^{207}Pb - ^{206}Pb возраста в млн лет в них.

Fig. 2. Cathodoluminescence images of zircon from the Kostomuksha Formation BIF. White circle - analytical points, numbers - ^{207}Pb - ^{206}Pb ages (in Ma) in them are shown

Апатит образует как относительно крупные (до 300 мкм) зерна в породе, так и минеральные включения в цирконах. Формирование апатита может быть связано с влиянием на ВIF кислого магматизма, несколько генераций которого, как было показано выше, проявлено в Костомукшской структуре.

Среди аксессуарных минералов в рассматриваемых ВIF установлен и циркон. Его призматические слабо удлиненные зерна размером 50-150 мкм, нередко имеют ядра, отличающиеся от кайм внутренним строением (рис. 2). В цирконах отмечены минеральные включения апатита, монацита, торита, калиевого полевого шпата.

Изученные цирконы часто содержат ядра (рис. 2), среди которых выделяется два типа: с тонкой осцилляторной зональностью, характерной для магматогенных цирконов и ^{207}Pb - ^{206}Pb возрастaми 3.0 и 2.8 млрд лет (рис. 2), а также однородные черные на CL-изображениях с возрастaм около 2.7 млрд лет (рис. 2). По предварительным данным возраст большей части зерен цирконов и ранней генерации кайм оценивается в 2730 млн лет. Кроме того, в цирконах из ВIF Корпангского карьера выделяется генерация с возрастaм 2640 млн лет, а Центрального – 2100 и 1860 млн лет.

С учетом того, что возраст толщи граувакк, с которыми чередуются ВIF, оценивается в 2.76-2.74 млрд лет [Слабунов и др., 2021], мезоархейские цирконы из ВIF – это фрагменты пород из области сноса, а цирконы с возрастaми 2.73, 2.64 и 1.86 млрд лет имеют метаморфогенную природу и маркируют главные стадии преобразования ВIF.

Главные выводы

1. В составе неархейской (2.76-2.74 млрд лет) костомукшской свиты гимольской серии в чередовании с граувакками и в ассоциации с кислыми вулканитами находятся ВIF, содержащие аксессуарные минералы: циркон, апатит, монацит, барит.

2. Цирконы из ВIF содержат магматогенные ядра с возрастaми 2.9-2.8 млрд лет, что указывает на наличие в областях сноса мезоархейских пород. Метаморфогенные цирконы имеют возрастa 2.73, 2.64 и 1.86 млрд лет и маркируют полиметаморфическую историю формирования ВIF.

Благодарности и источник финансирования. Данная работа выполняется при финансовой поддержке РФФ (грант 22-17-00026).

Литература

Бибикова Е.В., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Кирнозова Т.И. (2005) Геохронология архея западной Карелии. Стратиграфия. Геологическая корреляция 13 (5), 3-20.



Горьковец В.Я., Шаров Н.В. (Отв. ред.) (2015) Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минералогия). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 322 с.

Кожевников В.Н., Бережная Н.Г., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Сергеев С.А. (2006) Геохронология циркона (SHRIMP-II) из архейских стратотектонических ассоциаций в зеленокаменных поясах Карельского кратона: роль в стратиграфических и геодинамических реконструкциях. Стратиграфия. Геологическая корреляция 14(3), 19–41.

Самсонов А.В., Берзин Р.Г., Заможная Н.Г., Щипанский А.А., Бибикина Е.В., Кирилова Т.И., Коников А.Н. (2001) Процессы формирования раннедокембрийской коры Северо-Западной Карелии, Балтийский щит: результаты геологических, петрологических и глубинных сейсмических (профиль 4В) исследований. Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь – Калевала. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 109-143

Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А. (2017) Геологическая карта Юго-восточной Фенноскандии масштаба 1 : 750 000: новые подходы к составлению. Труды Карельского НЦ РАН. Серия «Геология докембрия» (2), 3-41. DOI: 10.17076/geo444

Слабунов А.И., Нестерова Н.С., Егоров А.В., Кулешевич Л.В., Кевлич В.И. Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Геохимия, 2021, Том 66, № 4, с. 291–307 DOI: 10.31857/S0016752521040063

Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapez B., Hofmann A., Konhauser K.O., Rouxel O. J. Iron Formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric // Economic Geology. 2010. V 105. pp. 467-508

Slabunov A.I., Lobach-Zhuchenko S.B., Bibikova E.V., Sorjonen-Ward P., Balagansky V.V., Volodichev O.I., Shchipansky A.A., Svetov S.A., Chekulaev V.P., Arestova N.A., Stepanov V.S. The Archean nucleus of the Fennoscandian (Baltic) Shield. // European Lithosphere Dynamics. London: The Geological Society Publishing House. 2006. pp. 627-644.

Slabunov A.I., Egorov A.V., Nesterova N.S. Geochemical types of Archean banded iron formations and the geodynamic settings of the basins, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia // Proceedings 4th Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2020. Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources. Kazan, 2020. pp. 256-261. DOI: 10.26352/E922_KAZAN2020

**НОВАЯ ТЕКТОНИЧЕСКАЯ КАРТА КАРЕЛИИ:
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ**

А.И. Слабунов, С.А. Светов, А.В. Степанова, П.В. Медведев, А.К. Полин

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, slabunov@krc.karelia.ru

Тектоническая карта – это картографическое отображение моделей строения (архитектуры) земной коры, а также геодинамических обстановок формирования, слагающих их вещественных комплексов. Подготовлена новая тектоническая карта Карелии, которая позволяет: выделять территории с различной историей развития земной коры; проводить анализ эволюции геодинамических обстановок при формировании земной коры региона от архея до палеозоя.

Ключевые слова: тектоническая карта; Карельский кратон; Беломорская провинция; Свеккофеннская провинция; архей; протерозой

NEW TECTONIC MAP OF KARELIA: THE MAIN CONCEPT AND ITS APPLICATION

A.I. Slabunov, S.A. Svetov, A.V. Stepanova, P.V. Medvedev, A.K. Polin

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

A tectonic map depicts the structure (architecture) of the Earth's crust and the geodynamic settings of formation of its constituent plutonic and supracrustal complexes. The newly compiled tectonic map of Karelia permits 1) to delineate areas that differ in evolution of Earth's crust and 2) to analyze evolution of geodynamic settings of formation of Earth's crust from the Archean to Paleozoic times.

Keywords: tectonic map, Karelian craton, Belomorian province, Svecofennian province, Archean, Paleoproterozoic,

Тектоническая карта – это картографическое отображение моделей строения (архитектуры) земной коры, а также геодинамических обстановок формирования, слагающих их вещественных комплексов [Тектонический..., 2016].

Тектонические карты являются обязательным элементом комплекта геологической информации о территории, поэтому работы по их созданию для территории Карелия были начаты в 30-е годы двадцатого века и получили развитие в эпоху грандиозных геологических исследований в его середине [например, Геология..., 1960]. Наиболее известные тектонические карты Карелии были подготовлены в конце двадцатого века и базировались на принципах выделения тектонических ярусов [Сыстра, 1991; Лазарев, 1989]. Эти карты, помимо тектонического районирования, содержат информацию, позволяющую анализировать структурную эволюцию различных тектонических доменов, что и в настоящее время остается актуальной задачей. Вместе с тем, смена геодинамической парадигмы, новые данные о строении и эволюции земной коры в раннем докембрии, появившиеся за последние десятилетия, требуют внедрения этих знаний и результатов в практику, в частности, тектонического картографирования.

Главная цель данной публикации рассмотреть базовые принципы, заложенные в легенду новой тектонической карты Карелии и продемонстрировать их реализацию (Рис. 1, 2).

Территория Республики Карелия находится в северо-западной части Восточно-Европейской платформы (кратона), где на поверхность в виде Фенноскандинавского (Балтийского) щита выходит ее древний фундамент. В южной и северо-восточной частях территории республики выделяются доплитные мезопротерозойские (рифейские) рифтогенные структуры: Ладожский авлакоген и рифтовая система Белого моря (рис. 1). Южная и юго-восточная часть территории сложена неопротерозойскими (вендскими), девонскими, карбоновыми и пермскими осадочными комплексами Русской плиты.

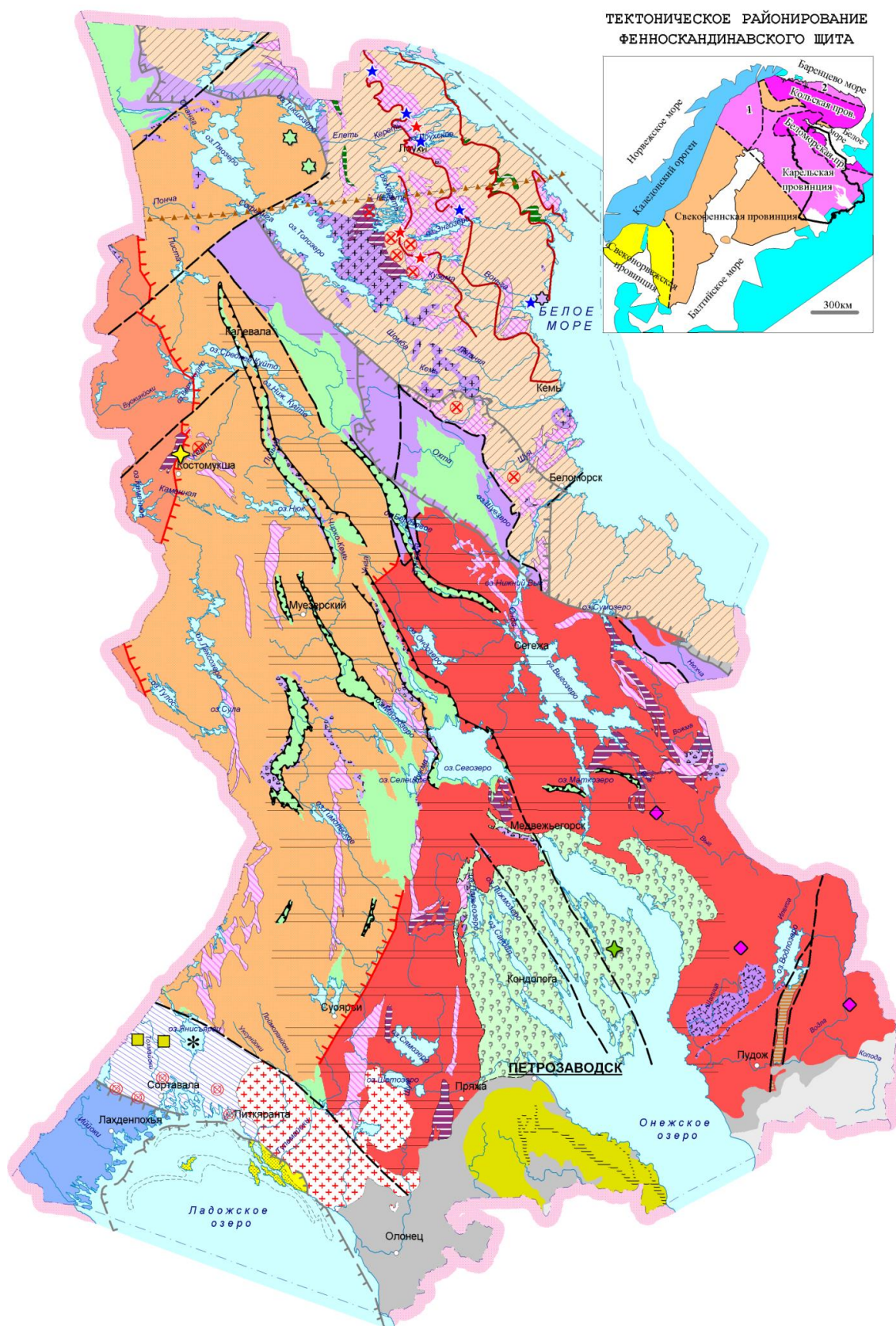


Рис. 1. Тектоническая карта Карелии (масштаб 1:2 000 000) [Слабунов, Полин, 2021]



Рис. 2. Легенда тектонической карты Карелии [Слабунов, Полин, 2021]

Фенноскандинавский щит с юга и востока ограничен распространением образований Русской плиты, а на северо-западе каледонским орогеном (рис. 1, врезка). Фенноскандинавский щит неоднороден, по особенностям строения и тектонического развития земной коры в его пределах выделяются провинции – крупные фрагменты земной коры отличные по совокупности признаков от соседних, но без обоснования природы этих отличий. В пределах щита выделяется 8 провинций: Карельская, Мурманская, Норрботтен, Беломорская, Кольская, Свекофеннская и Свекофеннонорвежская (рис. 1, врезка). Более глубокий анализ истории развития этих структур позволяет идентифицировать первые три провинции (Карельскую, Мурманскую и Норрботтен) как архейские кратоны [Слабунов, 2008; Слабунов и др., 2006]. Карельский кратон, самый крупный из них, занимает центральное положение в восточной части Фенноскандинавского щита и большую часть территории Карелии (рис. 1, врезка). К юго-востоку от него располагается Свекофеннская провинция, которая определяется как палеопротерозойский (1.9-1.8 млрд лет) Свекофеннский аккреционный подвижный (орогенный) пояс [Балтыбаев, 2013]. К северо-востоку от Карельского кратона находится Беломорская и Кольская провинции, земная кора каждой из которых имеет длительную самостоятельную историю формирования в архее, а в палеопротерозое (2.0-1.9 млрд лет) они развивались как элементы Лапландско-Кольского коллизионного орогена [Балаганский, 2002]. Ядро этого орогена сложено гранулитами Лапландского и Умбинского поясов и комплементарными им палеопротерозойскими мигматизированными гранитогнейсами и супракрустами Терского террейна (они находятся на территории Кольского полуострова в Мурманской области), а его юго-западный форланд представлен образованиями Беломорского подвижного пояса. Таким образом, на территории Карелии доступны для исследований образования Карельского архейского кратона, Беломорского докембрийского подвижного пояса и Свекофеннского палеопротерозойского орогена, каждый из которых рассматривается как самостоятельная тектоническая провинция [Слабунов и др., 2006] (Рис.1, врезка).

Появлению новой тектонической карты Карелии [Слабунов, Полин, 2021] предшествовало создание [Куликов и др., 2017] и апробация на крупнейших научных форумах [Куликов и др., 2015; Slabunov et al., 2016; Svetov et al., 2016] обзорной геологической карты юго-восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000. Эта карта содержит базовую информацию об основных геологических комплексах территории Карелии и является основой для тектонического районирования и геодинамической интерпретации геологических образований.

Тектоническое районирование докембрийских образований проведено по принципу истории становления континентальной земной коры. Этот подход подразумевает анализ истории формирования блоков земной коры и выделение в их составе террейнов - фрагментов, которые отличаются от соседних историей своего формирования и отделены от них разломами. В архее в пределах Карелии выделено четыре террейна: Водлозерский, Западно-Карельский, Центрально-Карельский и Беломорский (Рис.1). Каждый из них характеризуется различиями времени начала формирования континентальной коры, особенности истории ее развития в архее [Слабунов и др., 2006]. Среди палеопротерозойских структур выделяются отдельные элементы орогенных поясов (форланд коллизионного Лапландско-Кольского; форланд и небольшой фрагмент ювенильной земной коры аккреционного Свекофеннского), рифтогенные системы, связанные с воздействием на земную кору мантийных плюмов. Среди последних выделяются сумийский континентальный рифт «Ветренный пояс», ятулийско-людиковый и вепсийский внутриплитные бассейны, рифейская система континентальных рифтов.

На карте содержится информация о проявлениях в архее и протерозое дизъюнктивной и диапировой тектоники (рис. 1). Среди первых выделяются разломы различной природы (надвиги, сбросы и др.), а среди вторых - гранито-гнейсовые купола.

В легенде, помимо возраста стабилизации коры, важное значение уделено идентификации комплексов – индикаторов геодинамических обстановок (рис. 2). К ним относятся: офиолиты –

индикаторы спрединга и процессов становления океанической коры (в том числе, в супрасубдукционных обстановках); островодужные вулканиты, осадочные комплексы задуговых и преддуговых бассейнов, эколгитсодержащий меланж – рассматриваемые как индикаторы субдукционных обстановок; метаморфические комплексы высокобарической гранулитовой фации, граниты S-типа, надвиги, гранито-гнейсовые купола – индикаторы коллизионных обстановок; бимодальный, коматиитовый, щелочной, кимберлитовый магматизм, осадочные бассейны с проявлениями этого магматизма – индикаторы подъема мантийных плюмов и их взаимодействия с континентальной литосферой (рис. 1). Показана также астроблема, как проявление взаимодействия земной коры с небесными телами.

Таким образом, новая тектоническая карта Карелии наряду с информацией о тектоническом районировании территории, содержит большой пласт данных о геодинамических аспектах формирования земной коры региона с архея до палеозоя и позволяет: 1) выделять территории с различной историей становления земной коры; 2) проводить геодинамические реконструкции для разных временных срезов от архея до палеозоя. Эти данные могут быть полезны для оценки металлогенической специализации отдельных структур и районов.

Благодарности и источник финансирования. Работа является вкладом в исследования по теме АААА-А18-118020290085-4.

Литература

Балаганский В.В. Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГПУ. 2002. 32 с.

Балтыбаев Ш. К. Свекофеннский ороген Фенноскандинавского щита: вещественно-изотопная зональность и ее тектоническая интерпретация // Геотектоника. 2013, № 6. С.44–59.

Геология СССР. Т. 37. Карельская АССР. М.: Госгеолтехиздат. 1960. 740 с.

Куликов В. С., Володичев О. И., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Куликова В. В., Светов С. А., Слабунов А. И., Гоголев М. А., Полин А. К. Магматические и метаморфические формации и комплексы на новой геологической карте ЮВ Фенноскандии м-ба 1:750000 // Петрография магматических и метаморфических горных пород. Материалы XII Всероссийского петрографического совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2015. С.444-446.

Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А. Геологическая карта юго-восточной Фенноскандии масштаба 1 : 750 000: новые подходы к составлению // Труды Карельского НЦ РАН. № 2. Серия Геология докембрия. 2017. С.3-41.

Лазарев Ю. И. Тектоническая карта // Атлас Карельской АССР. М: ГУГК при СМ ССР. 1989. С.11.

Слабунов А.И., Полин А.К. Тектоническая карта // Атлас Республики Карелия. Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 14-15.

Слабунов А.И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2008. 296 с.

Слабунов А.И., Балаганский В.В., Щипанский А.А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эколгитов // Геология и геофизика, 2021. Т. 62, № 5. С. 648-675. DOI: 10.15372/GiG2021116

Слабунов А.И., Лобач-Жученко С.Б., Бибикина Е.В., Балаганский В.В., Сорьонен-Вард П., Володичев О.И., Щипанский А.А., Светов С.А., Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Степанов В.С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. №6. 2006. С. 3-32.

Сыстра Ю. Й. Тектоника карельского региона. Л.: Наука. 1991. 176 с.

Тектонический кодекс России. Межеловский Н.В. (Отв. ред.). М.: ГЕОКАРТА: ГЕОС. 2016. 240 с.



УДК 552.11

ВЕЛИКАЯ ДАЙКА КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА – МАРКЕР АРХЕЙСКОЙ КРАТОНИЗАЦИИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

**А.В. Степанова¹, А.В. Самсонов², Е.Б. Сальникова³, С.В. Егорова¹, Ю.О. Ларионова²,
А.А. Арзамасцев³, А.Н. Ларионов⁴, Р.В. Веселовский⁵**

¹Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, sa07sa@mail.ru

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, samsonovigem@mail.ru

³Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

⁵Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

Великая дайка Кольского полуострова (ВДК) расположена в западной части Мурманского кратона Фенноскандинавского щита. Возраст ее кристаллизации определен по результатам U-Pb (ID-TIMS) датирования бадделеита и составляет 2701±15 млн лет.

Дайка имеет простое внутреннее строение и сложена равномернозернистыми и плагиоклаз-порфировыми долеритами и габбро, в разной степени амфиболитизированными. Все породы имеют низкую магнезиальность, низкие концентрации Cr и Ni и являются продуктами дифференциации более примитивных расплавов. Анализ геохимических и Sr-Nd изотопных данных позволяет предполагать, что расплавы ВДК могли образоваться при смешении двух типов мантийных магм: деплетированных астеносферных расплавов и обогащенных расплавов, сформированных при плавлении литосферной мантии. Зарождение первичных расплавов ВДК, судя по слабо фракционированным спектрам тяжелых РЗЭ, происходило на небольших (<60 км) глубинах вне поля устойчивости граната.

Процессы зарождения расплавов и внедрение неоархейской ВДК происходили вскоре после завершения масштабного гранитного магматизма и формирования стабильной континентальной коры Мурманского кратона и маркируют кратонизацию континентальной литосферы в северо-восточной части Фенноскандинавского щита.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит, Мурманский кратон, неоархей, мафические дайки, бадделеит

THE GREAT DYKE OF THE KOLA PENINSULA AS A MARKER OF AN ARCHEAN CRATONIZATION IN THE NORTHERN FENNOSCANDIAN SHIELD

**A.V. Stepanova¹, A.V. Samsonov², E.B. Salnikova³, S.V. Egorova¹, Yu.O. Larionova², A.A. Arzamastsev³,
A.N. Larionov⁴, M.A. Sukhanova³, R.V. Veselovskiy⁵**

¹Institute of the Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

²Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the RAS, Moscow, Russia

³Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

⁴Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

⁵Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia

The crystallization age of the largest mafic dyke in the northern part of the Fennoscandian Shield, the Great Dyke of the Kola Peninsula (GDK), according to U-Pb D-TIMS baddeleyite dating, is 2680 ± 6 Ma.

The dyke has a simple internal structure and comprises equigranular and plagioclase-porphyratic dolerites and gabbro that are amphibolitized to varying degrees. All rocks are low-Mg (Mg# less than 0.37) with low concentrations of Cr and Ni and were derived through differentiation of more primitive melts. The analysis of geochemical and Sr-Nd



isotopic data suggests that GDK melts could be formed by mixing of two types of mantle melts: depleted asthenospheric melt and enriched melt formed via melting of a lithospheric mantle. The weakly fractionated HREE patterns indicate that primary GDK melts originated at shallow (<60 km) depths outside the garnet stability field.

The generation and injection of melts of the Neoproterozoic GDK occurred immediately after large-scale granitic magmatism and main crustal growth event in the Murmansk Craton and marked the cratonization of the continental lithosphere in the northeastern part of the Fennoscandian Shield.

Key words: Fennoscandian Shield, Murmansk Craton, Neoproterozoic, mafic dykes, baddeleyite

МОНАЦИТ ИЗ ГЛИНОЗЕМИСТЫХ ГНЕЙСОВ ЧУПИНСКОГО ПОЯСА, КАК ИНДИКАТОР ДВУХ ЭТАПОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТАМОРФИЗМА В БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

М.А. Суханова¹, Е.Б. Сальникова¹, П.Я. Азимов¹, А.В. Степанова²

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, maria.sukhanova.01@mail.ru

² Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Благодаря высокой температуре закрытия U-Pb изотопной системы и высоким содержаниям U монацит является одним из наиболее часто используемых минералов-геохронометров, позволяющих точно оценить возраст метаморфизма. Новые данные (U-Pb ID-TIMS) о возрасте монацита из кианитовых гнейсов Беломорской провинции Фенноскандинавского щита маркируют два крупных метаморфических события (архейское и палеопротерозойское), что подтверждается вариациями минеральных парагенезисов и структурными особенностями пород.

Ключевые слова: Беломорская провинция; монацит; U-Pb ID-TIMS; глиноземистые гнейсы; Чупинский пояс

MONAZITE FROM HIGH-AL GNEISSES OF THE CHUPINSKY BELT: DISTINGUISHING OF TWO HIGH-TEMPERATURE METAMORPHIC EVENTS IN THE BELOMORIAN PROVINCE

M.A. Sukhanova¹, E.B. Salnikova¹, P.Ya. Azimov¹, A.V. Stepanova²

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

² Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

Due to the high closing temperature of the U-Pb isotope system and high U content, monazite is one of the most used geochronometer minerals, which allows accurate estimation of the age of metamorphism. New data (U-Pb ID-TIMS) on the age of monazite from Al-gneisses of the Belomorian province of the Fennoscandian Shield marks two major metamorphic events (Archean and Paleoproterozoic), which is confirmed by variations in mineral assemblages and structural features of rocks.

Key words: Belomorian province; monazite; U-Pb ID-TIMS; high-Al gneisses; Chupinsky belt

Беломорская провинция (БП), расположенная в северо-восточной части Фенноскандинавского щита, является одной из наиболее детально изученных его структур. Известно, что архейские породы, слагающие БП, были преобразованы в результате архейского и протерозойского эпизодов регионального метаморфизма, оценки возраста которых были установлены главным образом на основании U-Pb датирования различных генераций циркона [Бибикова и др., 2004]. В то же время значения возраста других U-Pb минералов-геохронометров (титанита и рутила) варьируют в широких пределах 1740–2677 млн лет и 1740–1830 млн лет соответственно [Бибикова и др., 1999; Bibikova et al., 2001; Skiöld et al., 2001; Нестерова и др., 2011; Скублов и др., 2013].

Чупинский пояс, расположенный в осевой части Беломорской провинции, сложен главным образом глиноземистыми гнейсами, для которых характерны широкие вариации минерального состава и текстурных особенностей. Считается, что гнейсы Чупинского пояса представляют собой глубоко метаморфизованные осадочные породы [Ранний докембрий..., 2005].

Монацит является распространенным акцессорным минералом глиноземистых гнейсов Чупинского пояса, однако систематические U-Pb геохронологические исследования этого минерала в гнейсах БП не проводились. В то же время главным преимуществом монацита является относительно высокая температура закрытия его U-Pb изотопной системы. Монацит считается надежным минералом-геохронометром для оценки возраста

метаморфизма, так как редко наследуется при высокотемпературных преобразованиях пород, однако недавние исследования показывают, что в полиметаморфических комплексах может встречаться монацит, маркирующий каждое из метаморфических событий [Zhou et al., 2022 и другие исследования].

При проведении U-Pb (ID TIMS) геохронологических исследованиях единичных зерен монацита из Grt-Vt-Ку гнейсов центральной части Чупинского пояса (в окрестностях Амбарнского массива) был обнаружен монацит двух возрастных генераций – протерозойского и архейского возраста. Поздний монацит (1857 ± 4 млн лет) образует более крупные кристаллы ярко-желтого цвета с отчетливыми гранями, в то время как для раннего монацита (2736 ± 9 млн лет) характерны округлые зерна, имеющие темно-желтую окраску. Поскольку в БП известны метаморфические события как архейского, так и протерозойского возраста [Бибикова и др., 2004; Ранний докембрий..., 2005], то кажется логичным, что каждая из генераций монацита отражает возраст одного из этих событий. Наши термобарометрические исследования и анализ текстуры кианитовых гнейсов показали, что их формирование происходило в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации, но вслед за этим они были преобразованы в условиях среднетемпературной амфиболитовой фации.

U-Pb изотопные исследования были также проведены для монацита из глиноземистых гнейсов р-на Хитогоры, расположенного севернее, в окрестностях Верхне-Пулонгского озера (окрестности пос. Чупа). В изученных гнейсах монацит имеет окраску, варьирующую от светло-зеленой до желтой и образует как крупные кристаллы с отчетливыми гранями, так и мелкие со сглаженными гранями. Конкордантный возраст монацита соответствует 1874 ± 5 млн лет. Для изученного образца установлены параметры метаморфизма, отвечающие высокотемпературной амфиболитовой фации. Близкие оценки возраста получены ранее для цирконов и титанитов БП [Skiöld et al., 2001; Скублов и др., 2017].

Отсутствие монацита архейского возраста в гнейсах из района Хитогоры может свидетельствовать о более интенсивных преобразованиях в ходе протерозойского метаморфизма, которые привели к исчезновению раннего монацита. Для восстановления детальной метаморфической эволюции кианитовых гнейсов в архее и протерозое необходимо дальнейшее проведение U-Pb геохронологических исследований монацита и реконструкции P-T-условий метаморфизма гнейсов, в сочетании с анализом позиции монацита различного возраста в парагенезисах этих гнейсов.

Благодарности и источник финансирования. Исследования выполнены при поддержке плановой темы НИР FMUW-2022-0003 и FMUW-2022-0002.

Литература

Бибикова Е.В., Богданова С.В., Глебовицкий В.А., Клайссон С., Шельд Т. Этапы эволюции Беломорского подвижного пояса по данным U-Pb цирконовой геохронологии (ионный микрозонд NORDSIM) // Петрология. 2004. Т. 12, № 3. С. 227–244.

Бибикова Е.В., Слабунов А.И., Богданова С.В., Шельд Т. Тектоно-термальная эволюция земной коры щита в раннем докембрии по данным изотопного U-Pb-исследования сфенов и рутилов // Геохимия. 1999. № 8. С. 842–857.

Нестерова Н.С., Кириозова Т.И., Фугзан М.М. U-Pb возрасты сфенов из пород Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита (новые данные) // Геохимия. 2011. № 12. С. 1235–1242.

Ранний докембрий Балтийского щита / под ред. В. А. Глебовицкого. Санкт-Петербург: Наука, 2005. 711 с.

Скублов С.Г., Зак Т., Березин А.В., Мельник А.Е., Ризванова Н.Г. Результаты локального исследования (LA-ICP-MS) геохимии и U-Pb возраста рутилов из пород Беломорского подвижного пояса // Геохимия. 2013. № 2. С. 180–187.



Скублов С.Г., Азимов П.Я., Ли С.-Х., Глебовицкий В.А., Мельник А.Е. Полиметаморфизм чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (Фенноскандия) по данным изотопно-геохимического (U-Pb, REE, O) исследования циркона // Геохимия. 2017. № 1. С. 3–16.

Bibikova E., Skiöld T., Bogdanova S., Gorbachev R., Slabunov A. Titanite-rutile thermochronometry across the boundary between the Archaean Craton in Karelia and the Belomorian Mobile Belt, eastern Baltic Shield // Precamb. Res. 2001. V. 105. № 2–4. P. 315–330.

Skiöld T., Bogdanova S., Gorbatshev R., Bibikova E. Timing of late Palaeoproterozoic metamorphism in the northern Belomorian Belt, White Sea region: conclusions from U-Pb isotopic data and P-T evidence // Bull. Geol. Soc. Finland. 2001. V. 73. № 1–2. P. 59–73.

Zhou T., Reiner K., Sönke B., Yu L., Qiu-Li L. Timing and duration of discrete tectono-metamorphic events of the polymetamorphic high-grade Central zone of the Limpopo Belt (South Africa): Insight from in situ geochronology of monazite and zircon // Precamb. Res. 2022. V. 368. Art. 106469.

УДК 552.163

**ЭТАПЫ И ВОЗРАСТ МЕТАМОРФИЗМА В ПОРОДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
КИТОЙСКОГО БЛОКА (ШАРЫЖАЛГАЙСКИЙ ВЫСТУП СИБИРСКОГО КРАТОНА)**

В.П. Сухоруков¹, В.Б. Савельева²

¹Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия, svp@igm.nsc.ru

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Проведено изучение глиноземистых гнейсов и гранатовых амфиболитов восточной части Китойского блока Шарыжалгайского выступа (район Китойского силлиманитового месторождения). На основании петрографического изучения микроструктурных взаимоотношений минералов, их химической неоднородности, оценок PT – параметров метаморфизма и термодинамического моделирования установлено, что оба типа пород подверглись двухэтапному метаморфизму. Первый эпизод регионального метаморфизма характеризовался пиковыми параметрами $T = 780-800^{\circ}\text{C}$ и $P = 8-9$ и завершился снижением давления на регрессивной стадии. Второй этап метаморфизма протекал при низких давлениях 2-4 кбар и в широком интервале температур от 650-700 до 850 $^{\circ}\text{C}$. На основании датирования циркона и монацита из гранат-антофиллитовых гнейсов был установлен возраст метаморфизма в интервале 2489–2496 млн лет и 2446–2456 млн лет, что совпадает с возрастом гранитоидного магматизма.

Ключевые слова: Сибирский кратон, Китойский блок, гранулитовый метаморфизм, неоархей.

**STAGES AND AGE OF METAMORPHISM OF THE EASTERN PART OF KITOY BLOCK
(SHARYZHALGAI UPLIFT, SIBERIAN CRATON)**

V.P. Sukhorukov¹, V.B. Savel'eva²

¹ Institute of Geology and Mineralogy SB of the RAS, Novosibirsk, Russia

² Institute of the Earth Crust SB of the RAS, Irkutsk, Russia

Alumina gneisses and garnet amphibolites of the Eastern part of Kitoy block of Sharyzhalgay uplift (area of the Kitoy sillimanite deposit) were studied. On the basis of petrographic studies of mineral microstructures, chemical zoning, PT-estimates and thermodynamical modelling two studies of metamorphism were found in both types of rocks. The first episode of regional metamorphism (M1) occurred at $T=780-800^{\circ}\text{C}$ and $P= 8-9$ kbar and was followed by decompression on the retrograde stage. The second stage (M2) occurred at low pressure $P=2-4$ kbar and in the wide temperature interval $T=650-850^{\circ}\text{C}$. Two age peaks were established on the basis of U-Pb monazite and zircon dating in garnet-anthophyllite gneisses. Both of them correspond to the Neoproterozoic age: the age of M1 falls into the interval of ca. 2489–2496 Ma, the age of M2 – ca. 2446–2456 Ma. The high-temperature metamorphism of the Kitoy block and nearly coeval granitoid magmatism can be an evidence for the Neoproterozoic collision in SW Siberian craton.

Key words: Siberian craton, Kitoy block, granulite metamorphism, Neoproterozoic

Китойский и Иркутский гранулит-гнейсовые блоки образуют большую часть Шарыжалгайского выступа Сибирской платформы, они сложены однотипными породными ассоциациями, в обоих блоках для метамагматических пород по цирконам установлены два этапа гранулитового метаморфизма: 2.55-2.6 и 1.85-1.86 млрд лет, которые коррелируют с образованием гранитоидов (2.53-2.54 и 1.85-1.86 млрд лет) [Гладкочуб и др., 2005; Turkina et al., 2012 и др.].

Китойское силлиманитовое месторождение располагается в восточной части Китойского блока, вблизи его границы с Иркутским блоком. Район месторождения сложен силлиманитовыми, андалузит-силлиманитовыми, гранат-силлиманитовыми сланцами и гнейсами, которые переслаиваются с кварцитами, амфиболитами, мраморами. Толщи силлиманитосодержащих сланцев «подстилаются» амфиболитами и амфиболовыми

гнейсами, которые содержат пачки высокоглиноземистых сланцев, отдельные прослои биотитовых и биотит-гранатовых гнейсов.

Минеральные ассоциации гранатовых амфиболитов $Grt+Hbl+Pl+Qz\pm Crx$. В них установлено два типа реакционных микроструктур: 1. плагиоклаз-роговообманковые каймы вокруг граната и 2. Формирование мелкозернистого агрегата $Crx+Opx+Pl$ по более крупным зернам роговой обманки. Первый тип структур проявлен во всех образцах, второй – только в части. Плагиоклаз в реакционных каймах имеет более высокую основность, чем в матриксе породы, амфибол характеризуется более низкими содержаниями Na, Ti, Al (IV). Оценки P-T – параметров пика метаморфизма проводилась по минералам матрикса и ассоциации $Grt+Hbl+Pl+Qz$, полученные параметры отвечают $T = 710-770^{\circ}C$, $P = 8-9$ кбар. Для регрессивного этапа по составам минералов кайм $Hbl+Pl$ получены значения T порядка $700^{\circ}C$ при существенно более низких давлениях 1,3-2,5 кбар. Замещение роговой обманки мелкозернистым агрегатом с дупироксеновой ассоциацией происходило, вероятно, при температурах гранулитовой фации метаморфизма, порядка $850^{\circ}C$ [Sukhorukov, Savel'eva, 2020].

Глиноземистые гнейсы представлены двумя типами: гранат-силлиманитовые я ассоциацией $Grt+Crd+Sill+Bt+Pl+Qz$ и гранат-антофиллитовые с ассоциацией $Grt+Bt+Crd+Anth+Ged+Opx+Pl$. Обе ассоциации содержат акцессорные рутил, циркон и монацит. Главные реакционные структуры для гранат-силлиманитовых гнейсов включают кордиерит-кварцевые каймы вокруг зерен граната и замещение силлиманитом исходного андалузита от частичного в одних образцах, до полного в других. В кордиеритовых каймах отмечается резорбирование биотита. В гранат-антофиллитовых гнейсах встречаются следующие реакционные структуры: 1. Кордиерит-антофиллитовые каймы вокруг граната и биотита, 2. Каймы практически чистого анортита с включениями антофиллита вокруг исходного Ca-Na плагиоклаза, 3. Каймы антофиллита вокруг исходных ортопироксена и жедрита.

Оценки P-T-параметров метаморфизма производились с использованием традиционных минералогических геотермометров и геобарометров, геотермометров на основании содержания титана в цирконе и циркония в рутиле, а также термодинамического моделирования с использованием программного комплекса PERPLEX. Для оценки параметров первого этапа метаморфизма использовались центральные части минералов матрикса породы, второй стадии – минералов кайм. Полученные параметры отвечают для первой стадии метаморфизма $T = 780-800^{\circ}C$ и $P = 8-9$ кбар, второй стадии $T = 600-750^{\circ}C$, $P = 2-4$ кбар [Sukhorukov et al., 2020].

Таким образом как для гнейсов как основного так и глиноземистого состава установлена двухэтапная метаморфическая история, в которой первый этап регионального метаморфизма верхов амфиболитовой фации сменяется стадией декомпрессии и повторным метаморфизмом при низких давлениях.

Для возрастных оценок были использованы U-Pb датировки по циркону и монациту из образца гранат-антофиллитовых гнейсов. На основании 20 анализов монацита выделяется два отчетливых пика возраста около 2451 ± 16 и $2496\pm 9,5$ млн лет. По 33 анализам циркона, лежащим в интервале 2522-2421 млн лет выделяется один отчетливый пик около 2489 млн лет с слабо видимый пик около 2446 млн лет, что в целом совпадает с данными полученными по монациту. Эти данные хорошо коррелируют с данными, полученными Левицким (2010) по жилам пегматоидных гранитоидов (2483 ± 4 млн лет) и данными Глебовицкого (2011) по U-Pb датированию монацита ($2493\pm 1,2$ млн лет) и Sm/Nd датированию граната и силлиманита (2515 ± 17 , 2456 ± 50 , 2502 ± 17 и 2410 ± 110 млн лет).

Полученные данные возраста свидетельствуют в пользу предположения о неоархейском возрасте начала формирования Сибирского кратона [Smelov and Timofeev, 2007; Turkina et al. 2012].

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.



Литература

Гладкочуб Д. П., Донская Т. В., Мазукабзов А. М., Сальникова Е. Б., Склярёв Е. В., Яковлева С. З. Возраст и геодинамическая интерпретация гранитоидов китойского комплекса (юг Сибирского кратона) // Геология и геофизика. 2005. т. 46 (11). с. 1139–1150.

Глебовицкий В. А., Левченко О. А., Левицкий В. И., Ризванова Н. Г., Левский Л. К., Богомолов Е. С., Левицкий И. В. Возрастные рубежи проявления метаморфизма на Китойском силлиманитовом месторождении (Юго-Восточное Присяянье) // Доклады академии наук. 2011. Т. 436. № 3. с. 351–355.

Левицкий В. И., Резницкий Л. З., Сальникова Е. Б., Левицкий И. В., Котов А. Б., Бараиш И. Г., Яковлева С. З., Анисимова И. В., Плоткина Ю. В. Возраст и происхождение Китойского месторождения силлиманитовых сланцев (Восточная Сибирь) // Доклады академии наук. 2010. Т. 431. № 3. с. 386–391.

Turkina O. M., Verezhnaya N. G., Lepekhina E. N., Kapitonov I. N. U-Pb (SHRIMP II), Lu-Hf isotope and trace element geochemistry of zircons from high-grade metamorphic rocks of the Irkut terrane, Sharyzhalgay Uplift: implications for the Neoproterozoic evolution of the Siberian Craton // Gondwana Research., 2012, v. 21, p. 801–817.

Sukhorukov V. P., Savel'eva V. B. Two episodes of metamorphism in the rocks of the Eastern Kitoi block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian platform) according to the garnet amphibolite data // Geodynamics & Tectonophysics 11 (1), 2020, 107–121

Sukhorukov V. P., Savel'eva V. B., Jiang Y., Li Zh. P-T path of metamorphism and U-Pb monazite and zircon age of the Kitoi terrane: Implication for Neoproterozoic collision in SW Siberian Craton // Geoscience Frontiers. 1 (6), 2020, 1915-1934

УДК 552.4

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА МАНТИЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ БАЗИТОВЫХ АССОЦИАЦИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ Nd ДАННЫХ

О.М. Туркина

Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия, turkina@igm.nsc.ru

Величины $(La/Nb)_{pm}$, $(Th/La)_{pm}$, $(La/Sm)_{pm}$, $(NbY)_{pm}$ отношений <1 в мафических породах отвечают деплетированному мантийному источнику, тогда как ≥ 1 - недеплетированному/обогащенному. $(La/Nb)_{pm}$ не изменяется при плавлении мантийных перидотитов, Nb минимум это характеристика литосферной мантии, метасоматизированной флюидом/расплавом. По изотопному Nd составу выделяется два источника: (1) деплетированный ($+\epsilon_{Nd}$), который отвечает астеносферной и/или литосферной мантии реститового происхождения, (2) обогащенный ($-\epsilon_{Nd}$) литосферный с пониженным Sm/Nd в результате метасоматоза. Оценки характера мантийных источников мафических пород по их редкоэлементному и изотопному составу могут как коррелировать между собой, так и различаться.

Ключевые слова: мафические породы, редкие элементы, изотопный состав, мантийные источники.

ANALYSIS OF MANTLE SOURCES FOR MAFIC ASSOCIATIONS ON THE BASIS OF GEOCHEMICAL AND Nd ISOTOPIC DATA

O.M. Turkina

Institute of geology and mineralogy SD of the RAS, Novosibirsk, Russia

The $(La/Nb)_{pm}$, $(Th/La)_{pm}$, $(La/Sm)_{pm}$, $(NbY)_{pm}$ ratios <1 in mafic rocks correspond to a depleted mantle source, while ≥ 1 corresponds to a undepleted/enriched source. $(La/Nb)_{pm}$ does not change during melting of mantle peridotites, so the Nd minimum is a characteristic feature of the lithospheric mantle metasomatized by fluid/melt. According to the isotopic Nd composition, there are two mantle sources: (1) depleted ($+\epsilon_{Nd}$), which corresponds to the asthenospheric and/or lithospheric mantle of restite origin, (2) enriched ($-\epsilon_{Nd}$) lithospheric, having decreased Sm/Nd due to metasomatism. Estimates of the character of the mantle sources of mafic rocks in terms of their trace element and isotopic composition can either correlate with each other or differ.

Key words: mafic rocks, trace element, isotopic composition, mantle sources.

Для суждения о составе мантии и его изменении во времени имеется два источника сведений. Прямую информацию дают перидотитовые ксенолиты из кимберлитовых трубок, но они являются пробами только литосферной мантии преимущественно под древними кратонами. Косвенными источниками сведений являются мафические магматические породы, которые продуцируются различными мантийными источниками главным образом литосферной и астеносферной мантией. Преимущество мафических пород для оценки мантийных источников состоит в том, что по ним может быть получен возраст и, следовательно, удастся проследить изменение состава мантии во времени. Их слабая сторона заключается во фракционировании элементов в процессах плавления/кристаллизации, что требует применения особых приемов для реконструкции геохимических характеристик мантийных источников. Важным дополнением к анализу состава мантии служит изотопный состав мафических пород, который тождественен таковому источника, но в отличие от редкоэлементного является долговременной его характеристикой из-за больших периодов полураспада используемых изотопов. В настоящем сообщении приводится анализ возможных индикаторных геохимических параметров, позволяющий оценить характер мантийных источников мафических пород.

В работе [Hofmann, 1997] показано, что отношения сильно несовместимых редких элементов практически не изменяются в процессе плавления, то есть их отношения в базитовых расплавах близки таковым в мантийных источниках. Это заключение можно продемонстрировать путем расчетного моделирования плавления перидотитов, отвечающих по составу примитивной и деплетированной мантии (рис. 1а). В первом случае отношения $(La/Nb)_{pm}$, $(Th/La)_{pm}$, $(La/Sm)_{pm}$ при степени плавления (F) 5-20% равны примитивно-мантийным, а $(NbY)_{pm}$ возрастает до 2 при F=5%, а при плавлении деплетированного источника расплав соответственно имеет близкие к нему отношения (рис. 1б). Из этого следует, что $(La/Nb)_{pm}$, $(Th/La)_{pm}$, $(La/Sm)_{pm}$, $(NbY)_{pm}$ отношения <1 в мафических породах возможны только при плавлении деплетированного мантийного источника, тогда как ≥ 1 отвечают недеплетированному или обогащенному источнику. Наиболее информативным является $(NbY)_{pm}$, поскольку включает элементы с максимальной разницей в коэффициентах распределения рстит/расплав и не фракционирующие в процессах мантийного метасоматоза под действием флюида/расплава. Таким образом, величина $(NbY)_{pm}$ определяет наклон базовой линии мультиэлементного спектра, проходящей через немобильные элементы, то есть отражает характер мантийного источника. Важно отметить, что плавление мантийных перидотитов не приводит к изменению $(La/Nb)_{pm}$ из-за отсутствия рститовых фаз, обеспечивающих относительное фракционирование этих элементов, следовательно, наличие Nb минимума на мультиэлементном спектре мафических пород является характеристикой мантийного субстрата, а именно литосферной мантии, испытавшей метасоматоз под действием флюида/расплава. Наиболее вероятен субдукционно-связанный метасоматоз кремнекислым расплавом, образующимся из базитового или пелитового источника при высоком давлении и низкой степени плавления, что обеспечивает присутствие рутила среди рститовых фаз. Следует отметить, что фракционная кристаллизация мафического расплава, повышая концентрации несовместимых элементов, также не приводит к изменению их отношений подобно процессу парциального плавления. То же имеет место и при формировании плутонических мафических пород, которые сложены ассоциацией минералов (кумуляты), отвечающих различной степени кристаллизации магмы, поскольку обычный набор кристаллизующихся фаз (Ol, Орх, Срх, Pl) не вызывает относительного фракционирования рассматриваемых редких элементов [Туркина и др., 2022].

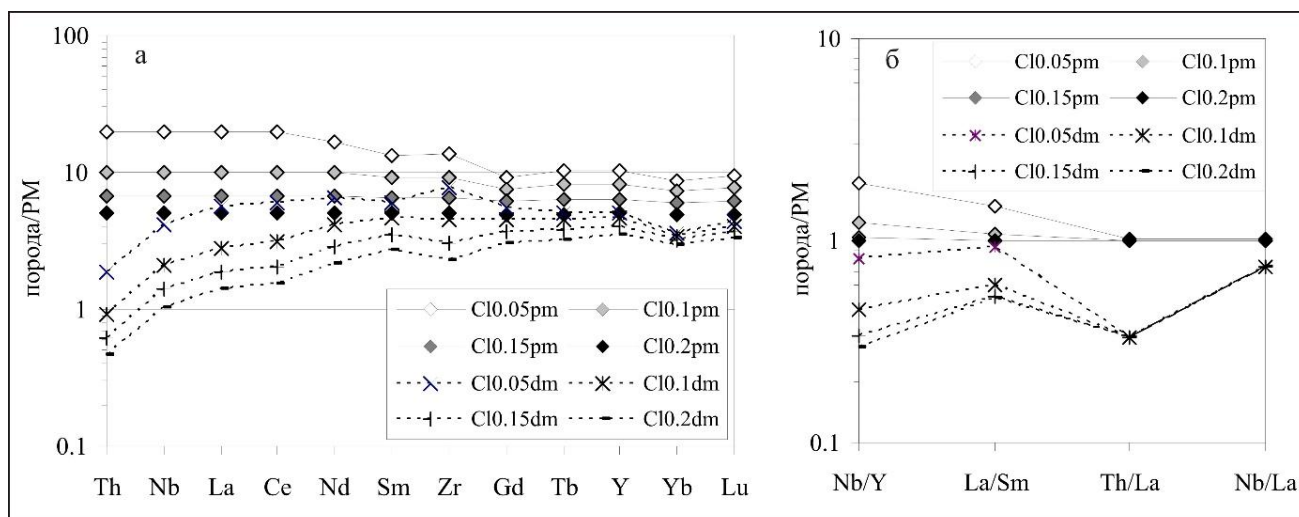


Рис. 1. Мультиэлементные спектры (а) и индикаторные отношения элементов (б) для модельных расплавов из примитивно-мантийного (Cl_{pm}) и деплетированного (Cl_{dm}) мантийного источников при степени плавления от 5 до 20%.

Fig. 1. Multi-element spectra (a) and indicator ratios of elements (b) for model melts from primitive mantle (Cl_{pm}) and depleted (Cl_{dm}) mantle sources at melting degree from 5 to 20%.



Как отмечалось выше изотопный Nd состав мафических пород представляет долговременную характеристику их мантийного источника. Существует два принципиально различных в изотопном плане источника: (1) деплетированный с положительными ϵ_{Nd} , который отвечает астеносферной и/или литосферной мантии реститового происхождения, (2) обогащенный с отрицательными ϵ_{Nd} , отражающими привнос некогерентных редких элементов и понижение Sm/Nd вследствие метасоматических процессов. Обогащенная мантия отвечает литосферному источнику (субконтинентальной литосфере), которая изолирована от конвектирующей астеносферы и может сохранять долговременное изменение своего редкоэлементного и изотопного состава. Оценки характера мантийных источников мафических пород по их редкоэлементному и изотопному составу могут как коррелировать между собой, так и различаться, в последнем случае обогащение мантийного источника некогерентными редкими элементами непосредственно предшествовало плавлению и не отразилось на его изотопном составе. Образование изотопно-обогащенных мантийных источников может происходить либо задолго до плавления и формирования мафического расплава в результате метасоматоза, сопровождавшегося привнесом наиболее несовместимых редких элементов, либо практически мгновенно при участии в метасоматозе расплава из древних субдуцированных осадков. Выбор между этими вариантами сложен и неоднозначен и требует привлечения дополнительной информации о геологической истории рассматриваемого региона.

Таким образом, комплексный анализ индикаторных отношений редких элементов позволяет оценить характер мантийных источников (деплетированный/обогащенный) мафических пород, а в сочетании с их изотопными параметрами ограничить время их формирования.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГМ СО РАН.

Литература

Туркина О.М., Изох А.Э., Лавренчук А.В., Шелепов Я.Ю. Состав и изотопные параметры метабазальтов и габброидов Онотского гранит-зеленокаменного блока (юго-запад Сибирской платформы) как индикаторы эволюции литосферной мантии от архея к палеопротерозою // Петрология. 2022. Т. 30. № 5 (в печати).

Hofmann A.W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism // Nature. 1997. V. 385. P. 219-229.



УДК 552.4

ЭВОЛЮЦИЯ МАНТИИ ОТ АРХЕЯ К ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЮ: СИНТЕЗ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ Nd ДАННЫХ ДЛЯ МАФИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ ЮГО-ЗАПАДА СИБИРСКОГО КРАТОНА

О.М. Туркина¹, А.Э. Изох¹, Н.Г. Бережная²

¹Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия, turkina@igm.nsc.ru

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

На основании геохимических и изотопных Nd данных по раннедокембрийским базитам оценена эволюция мантии ЮЗ Сибирского кратона от архея к палеопротерозою. Источники архейских базитов варьировали от слабо деплетированных до примитивно-мантийных, то есть архейская мантия была менее дифференцирована чем современная. С 2.8-2.7 млрд лет предполагается формирование метасоматически измененной литосферной мантии. Геохимические и изотопные параметры палеопротерозойских базитов отражают увеличение мантийной гетерогенности и формирование долгоживущих обогащенных источников. От архея к палеопротерозою произошла дифференциация мантии по редкоэлементному и изотопному Nd составу, обусловленная обособлением и локальным метасоматозом субконтинентальной литосферной мантии.

Ключевые слова: мафические породы, мантийные источники, архей, палеопротерозой.

MANTLE EVOLUTION FROM ARCHAEN TO PALEOPROTEROZOIC: SYNTHESIS OF TRACE ELEMENT AND Nd ISOTOPIC DATA ON MAFIC ASSOCIATIONS FROM SOUTH-WESTERN SIBERIAN CRATON

O.M. Turkina¹, Izokh A.E.¹, N.G. Berezhnaya²

¹Institute of geology and mineralogy SD RAS (Koptuga pr., 3, Novosibirsk, Russia, 630090)

²A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

Based on trace element and Nd isotopic data on Early Precambrian mafic rocks, we traced the evolution of the mantle of the SW Siberian craton from the Archean to Paleoproterozoic. The sources of the Archean mafic rocks varied from weakly depleted to primitive mantle, i.e. the Archean mantle was less differentiated than modern one. From 2.8-2.7 Ga, it is assumed an existence of a metasomatically altered lithospheric mantle. The trace element and isotopic parameters of Paleoproterozoic mafic rocks reflect an increase in mantle heterogeneity and the formation of long-lived enriched sources. From the Archean to the Paleoproterozoic, the mantle differentiated in terms of trace element and Nd isotopic composition, due to separation and local metasomatism of the subcontinental lithospheric mantle.

Key words: mafic rocks, mantle sources, Archean, Paleoproterozoic

Раннедокембрийские породы основного состава являются основным источником информации о составе эволюции мантии во времени. Метабазальты архейских зеленокаменных поясов (ЗКП) характеризуются преимущественно положительными $\epsilon_{Nd}(t)$, отражающими формирование из деплетированной мантии. В то же время для ряда палеопротерозойских дайковых и интрузивных комплексов установлены отрицательные значения $\epsilon_{Nd}(t)$, свидетельствующие о вкладе долгоживущих обогащенных источников. Анализ геохимии базальтов ЗКП выявил гетерогенность их мантийных источников, варьирующих от деплетированных до слабо обогащенных, однако различия между этими источниками были малы в сравнении с таковым в мантийных источниках современных базальтов срединных хребтов (MORB) и океанических островов (OIB). По данным [Condie, 2018], геохимические сигнатуры, присущие обогащенным, деплетированным и гидратированным

(преобразованным под действием флюида) мантийным источникам становятся более отчетливыми у базальтов переходного периода геологической истории от 3 до 2 млрд лет.

Шарыжалгайский выступ ЮЗ Сибирского кратона состоит из гранит-зеленокаменных и гранулитогнейсовых блоков, в которых проявлены два главных этапа базитового магматизма. Мезоархейскому этапу отвечают базальты Онотского (~2.88 млрд лет) и Урикского (~2.8 млрд лет) ЗКП, а неоархейскому – магматические протолиты мафических гранулитов (~2.7-2.66 млрд лет). Палеопротерозойский постколлизийный базитовый магматизм (1.87-1.84 млрд лет) представлен интрузиями габброноритов, монцодиоритов, габбро-долеритами дайковых роев, сосредоточенных преимущественно в Иркутском гранулитовом блоке. В данной работе использована методика анализа характера источников раннедокембрийских базитов Шарыжалгайского выступа, изложенная в работе [Туркина, 2022, настоящий сборник] с целью проследить эволюцию мантии юго-запада Сибирского кратона от архея к палеопротерозою.

Среди архейских базитов выделяется три геохимических типа. Первый характеризуется обеднением легкими РЗЭ $(La/Sm)_n=0.9-1.1$, отсутствием Nb минимума $(Nb/Nb^*=0.9-1.8)$ и представлен метабазами юга Урикского ЗКП и частью мафических гранулитов. Второй тип - это метабазалты Онотского ЗКП слабо обогащенные легкими РЗЭ (0.9-1.7) и обедненные Nb $(Nb/Nb^*=0.4-0.7)$. Третий тип характеризуется различной степенью обогащения легкими РЗЭ $(La/Sm)_n=1.1-2.2$, отчетливым обеднением Nb $(Nb/Nb^*=0.2-0.8)$ и включает метабазалты центральной части Урикского ЗКП и большинство мафических гранулитов. Два первых типа имеют $(Nb/Y)_{pm}=0.6-1.0$, что отвечает слабо деплетированному источнику и согласуется с их положительными $\epsilon_{Nd}(t)$ от +4.1 до -0.1. Расчетное моделирование показывает возможность образования базитов первого типа из слабо деплетированных до примитивно-мантийных источников, которые вероятно отвечали архейской конвектирующей мантии. Третий тип имеет слабо повышенное $(Nb/Y)_{pm}=0.8-1.2$, резко обеднение Nb и $\epsilon_{Nd}(t)$ от +2.8 до +0.5. Модельными расчетами показана возможность его образования из исходно деплетированного источника, метасоматизированного под действием расплава из субдуцированных базитов, что предполагает генерацию из литосферной мантии. Литосферный мантийный источник наиболее вероятен для пород второго типа из Онотского ЗКП.

Палеопротерозойские базитовые комплексы включают два контрастных геохимических типа. Первый представлен габброноритами Онотского блока с низкими $(La/Sm)_n$ (1.0-1.4), $(Nb/Y)_{pm}$ (0.7-1.0), слабым обеднением Nb $(Nb/Nb^*=0.7-1.0)$ и $\epsilon_{Nd}(t)$ от -0.7 до -1.4. Второй тип, доминирующий в Иркутском блоке включает интрузивные монцогаббронориты и монцодиориты, а также габбро-долериты. Все эти породы при широком диапазоне Mg# (84-39) имеют общие черты: высокое $(La/Sm)_n=3.0-5.4$, повышенное $(Nb/Y)_{pm}=1.2-2.8$, резкое обеднение Nb $(Nb/Nb^*=0.1-0.6)$ и низкие $\epsilon_{Nd}(t)$ от -5.9 до -9.6. Согласно модельным оценкам источник пород первого типа был слабо деплетирован и сходен с таковым архейских базитов Онотского ЗКП, и его изотопный Nd состав соответствует эволюции архейской мантии во времени при слабо пониженном $^{147}Sm/^{144}Nd$ (~0.19), палеопротерозойские габбронориты унаследуют и слабое обеднение Nb, присущее также мезоархейской литосферной мантии. Все эти данные предполагают литосферный мантийный источник как мезоархейских, так и палеопротерозойских базитов Онотского блока, причем основные характеристики этого источника сложились уже в архее. Как редкоэлементные, так и изотопные характеристики палеопротерозойских базитов Иркутского блока отвечают долгоживущему обогащенному литосферному мантийному источнику. Принципиальная модель его образования - это метасоматоз под действием кислого расплава, образованного вероятно из пород субдуцирующей плиты, вклад которого оценивается не менее 10%. Изотопные параметры данного типа палеопротерозойских базитов требует снижение $^{147}Sm/^{144}Nd$ до 0.13-0.15, чтобы обеспечить эволюцию изотопного состава неархейской мантии до $\epsilon_{Nd}(t)$ от -5.9 до -9.6.



Выводы

1. Среди мезо-неоархейских базитов Шарыжалгая отсутствуют породы сопоставимые по геохимии с современными NMORB и OIB. Мантийные источники архейских пород варьировали от слабо деплетированных до примитивно-мантийных, что согласуется с их изотопными параметрами: $\epsilon_{Nd}(t)$ от 0 до +5.2, то есть архейская как конвектирующая, так и литосферная мантия ЮЗ Сибирского кратона была слабо дифференцированной. Мантийные источники архейских metabазитов Шарыжалгая должны быть менее деплетированы в отношении наиболее некогерентных элементов чем современная DM. С рубежа 2.8-2.7 млрд лет появляются обедненные Nb базиты, что предполагает формирование литосферной мантии, изолированной от конвекции и испытавшей ту или иную форму метасоматоза.

2. Геохимические и изотопные параметры палеопротерозойских базитов Шарыжалгая свидетельствуют о резких различиях мантийных источников и появлении долгоживущих обогащенных мантийных областей к рубежу ~1.86 млрд лет. Обогащенным источником могла быть только литосферная мантия, испытавшая локальное метасоматическое преобразование в архее.

3. От мезо-неоархея к палеопротерозою произошла дифференциация мантии по редкоэлементному и изотопному Nd составу, обусловленная обособлением субконтинентальной литосферы от конвектирующего слоя и локальным метасоматическим преобразованием ее в архее, что привело к резким различиям в источниках, генерирующих палеопротерозойские мафические магмы.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-05-00265).

Литература

Туркина О.М. Анализ характера мантийных источников базитовых ассоциаций на основе геохимических и изотопных Nd данных // Настоящий сборник.

Condie K.C. A planet in transition: the onset of plate tectonics on Earth between 3 and 2 Ga? // *Geoscience Frontiers*. 2018. V. 9. P. 51-60.

УДК 553.062

СРАВНИТЕЛЬНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ АРХЕЙ-ПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЭТАПОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

С.И. Турченко

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия, turchsi@mail.ru

Рассматривается глобальная металлогения в период двух ранних этапов развития Земли как геологического тела - в архейский и протерозойский, причем возрастное завершение последнего осуществлялось при существенном геодинамическом изменении её поведения в северном и южном полушариях. Наиболее ранний возрастной этап эволюции Земли - эоархей, представляющий собой подразделение эпохи до-геологической жизни Земли от периода планетной аккреции $T_0 = 4.5$ до 3.8 млрд лет, куда входили этапы: последней стадии аккреции Земли, образования протоядра, примитивной мантии и первичной мафитовой протокры, а также время тяжелой метеоритной бомбардировки, когда большая часть первичной протокры была разрушена. Распределение примитивной мантии и первичной мафитовой протокры на поверхности Земли при её аккреции было весьма неравномерным, что сказалось в последующем на формировании вещественных неоднородностей.

Ключевые слова: металлогения Земли; ранний и поздний докембрий; геодинамика.

COMPARATIVE METALLOGENY OF THE ARCHEAN-PROTEROZOIC STAGES GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE EARTH

S.I. Turchenko

Institute Precambrian geology and geochronology of the RAS, St. Petersburg, Russia

It is consideration of the global metallogeny in period two early stages developing of the Earth as geological body - at Archean and Proterozoic, moreover, it is known that age completion of last eon was carried out during geodynamic changed of the Earth behavior at northern and south hemispheres. More earliest age stage evolution of the Earth – Eoarchean, that present epoch pre-geological life of the Earth from period planetary accretion $T_0 = 4.5$ up to 3,8 Ga in which enter: last stages of accretion, forming protocore, primitive mantle and mafic protocrust and time heavy meteoritic bombardment destroyed part of initial crust Distribution primitive mantle and mafic protocrust on surface of the Earth were no uniform and this in future reflex on forming of material nonhomogeneous.

Key words: metallogeny of the Earth; Early and Later Precambrian; geodynamics.

Палеоархейская эра, как ранняя часть архейского эона, собственно с которой начался докембрийский этап геологического развития Земли [Snyder et al., 2000]., характеризовалась набором полезных ископаемых, которые являются более типичными для неоархейско-палеопротерозойской эры. Некоторые типы месторождений в палеоархее отличаются структурно-тектоническим положением от более молодых аналогов. Например, несмотря на сходство состава флюидов и механизмов рудообразования, палеоархейские месторождения золота и колчеданных руд Cu, Zn, Pb формировались в тектонических обстановках отличных от обстановок линейного орогенеза, характерных для более молодых докембрийских месторождений.

Ранний рост земной коры произошел в результате действия серии мантийных плюмов, вызывавших выплавление мафических базальтов, которые сформировали подобия океанических плато. Ранние плюмы инициировали коровый рост геологическим площадям, а не поясам, как геологическим особенностям плит-тектоники. Периодическое развитие вулканических комплексов в палеобассейнах на мафит-ультрамафитовом плюмовом плато, создавало идеальные условия для формирования поколения вулканогенных массивных сульфидных (колчеданных) месторождений. Такого рода объекты являлись материнским источником мафит-

ультрамафитовых пород – носителей никелевого и платиноидного оруденения независимо от возраста (от палеоархея до протерозоя). Однако из-за дефицита серы в таких древнейших отложениях сульфидные никелевые и платинометалльные месторождения неизвестны, выявлены лишь небольшие месторождения (например, Шангани в Ю. Африке) и рудопроявления в коматиитах с возрастом 3526 ± 48 и $\epsilon Nd +0.7$ из низов группы Онвервайт зеленокаменного пояса Барбертон в Каапваальском кратоне Ю. Африки. Для мафит-ультрамафитовых пород мантийного происхождения мезо- и неоархейского возраста (3.4-2.6 млрд лет) установлены сульфидные Ni-PGE месторождения в коматиитах и телах коматиитовых перидотитов известные лишь в кратоне Йилгарн Зап. Австралии (рудный район Камбалда), в других кратонах Мира – только рудопроявления и все они составляют ранний этап формирования Ni-PGE месторождений. Более поздними (около 2450 млн лет) Ni-PGE месторождениями являются палеопротерозойские рифтогенные месторождения Фенноскандинавского щита (Мончегорское и Федорово-Панских Тундр в России и Пеникат-Портиво в Финляндии).

Возможно, самым значительным металлогеническим различием палеоархея от мезо- неоархея и протерозоя были обстановки, в которых развивались золоторудные месторождения. Жильные золоторудные месторождения (lode deposits) на протяжении мезоархея-палеопротерозоя (3200-1600 млн лет) были связаны с линейными, масштаба земной коры, сдвиговыми зонами. В противоположность этому, жильные золоторудные месторождения, сформированные до 3200 млн лет, были связаны с крупными кольцевыми разломами, вдоль которых концентрировались гранитные комплексы, такие как месторождения Бамбу Крик в кратоне Пилбара или месторождения Витватерсранд в кратоне Каапваал, образованные в обстановках корового растяжения.

Периодические плавления литосферной мантии во время последовательных плюм событий производили все более эволюционированные расплавы (Smithies et al., 2005), которые были перспективными для накопления литофильных элементов типичных для редкометалльных месторождений, например, Ta и Sn пегматитовые месторождения в кратоне Пилбара. Первые граниты А-типа, с которыми связаны подобные месторождения, появляются лишь в неоархее (~2.8 млрд лет) и далее они прослеживаются на протяжении всей геологической истории развития Земли. Однако, расцвет этого магматизма в докембрии приходится на интервал времени ~ 2.0-1.0 млрд лет. С этого времени начинается новая стадия мантийной динамики, определившей начало нового плюм-суперконтинентального цикла. Главными типами месторождений, среди которых встречаются крупные и уникальные объекты, являются редкометалльные и Sn-редкометалльные, Cu-U-Au-REE, Fe-Ti-апатитовые и U-месторождения типа «несогласий». Было установлено, что большая часть крупных таких месторождений была сформирована в два основных эпизода 1.85-1.70 и 1.30-1.00 млрд лет и практически все они были связаны с активностью мантийных плюмов. Эти минеральные системы были образованы во внутриплитных или дуговых рифтовых тектонических условиях. К таким условиям принадлежит также формирование железорудных месторождений железистой формации в Южной Африке группы Трансвааль и бассейна Хамерсли в Австралии, которые эквивалентны возрасту около 2800 млн лет, а также более поздние архейские месторождения Кривого Рога на Украине и Костомукши, Оленегорска в Карело-Кольском регионе Фенноскандинавского щита.

Минеральные системы, связанные с анорогенным магматизмом палеопротерозоя охватывают широкий круг магмато-гидротермальных месторождений, из которых экономически наиболее важными являются Fe-окисные-Cu-Au месторождения, такие как мирового класса месторождение Олимпик Дэм в Южной Австралии. В этой же группе находятся Pb-Zn-Ag месторождения (МакАртур, Маунт-Айза и Брокен-Хилл) с возрастом около 1700 и 1500 млн лет и Cu-Au-W месторождения (ороген Каприкорн). В щелочно-ультраосновных породах возраста 1100 и 800 млн лет, в том числе и карбонатитах, и лампроитах, были установлены месторождения алмазов, как в лампроитовых трубках Аргайл с возрастом 1180 млн лет.

U-Pb изотопные возраста по циркону, вместе с Nd изотопными данными показывают значительный рост континентальной коры, начиная с 1.9 млрд лет. С этим ростом коры был связан этап образования ювенильной коры в палеопротерозое. Этот пик формирования континентальной коры и соответственно образование

континентов являлся также пиком глобального проявления металлогении. Один из последних этапов прироста коры периода 2.1-1.6 млрд лет отвечал росту суперконтинента Родиния и дальнейшему в период 1.4-0.6 млрд лет его распаду и росту протоматериков Гондвана и Лавразия. Неоднородность литосферы, существенно оформленная к конечному докембрийскому этапу геологического развития Земли, отражалась в неоднородном характере распределения месторождений в этих позднедокембрийских континентах, составляющих их минерально-сырьевой потенциал (Рис.1). Структурно-тектоническое развитие докембрийского протоматерика Лавразия (состоящего из фундаментов Восточно-Европейской, Восточно-Сибирской и Северо-Американской платформ) происходило по платформенному сценарию, поэтому не было и активного проявления металлогенических следствий, а отсюда и проявления разнообразных рудообразующих процессов.

В южной гемисфере Земли дело обстояло сложнее, поскольку мезо-неопротерозойская эра не заканчивалась на протоматериках Гондванской группы формированием платформенных структур, а в них продолжали развиваться позднепротерозойские орогенические зоны (1600-900 млн лет) и пояса тектоно-термальной переработки древних структур возраста около 1100 млн. лет. Тектонофизическое объяснение этому различию лежит в глобально-планетарном явлении – устойчивом проявлении 23.4-градусного наклона оси вращения Земли и ее периодической прецессии на 1-1.5 градуса, возникших именно к этому периоду жизни Земли. Из-за этого более тяжелые ядерно-мантийные массы оболочек Земли сместились в сторону южного полушария, проявив тем самым продолжение тектонофизической активности плюмовой и астеносферной природы орогенических структур позднего протерозоя в этой части Земли.

Период от 900 до 600 млн лет в южном полушарии Земли оказался также, как и в северном не очень продуктивным на проявление рудных месторождений, так как заключительный этап докембрийского геологического развития Земли и здесь от активных тектонических процессов сменился погружением континентов, которое было связано, возможно, с воздыманием океанических хребтов, т.е. началом нового этапа жизни Земли. Этот этап – (фанерозойский) выразился в активном перемещении тектонических плит (т.е. активном проявлении плейт-тектоники), созидании частых орогенических циклов и в формировании разнообразия рудообразующих процессов, достигнувших беспрецедентно высокого уровня.

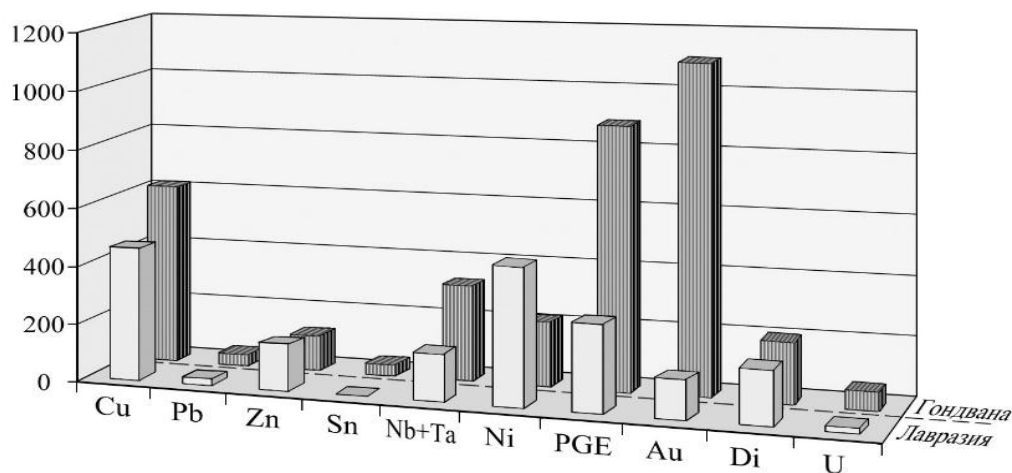


Рис.1. Сравнительная диаграмма потенциальной ценности минеральных ресурсов протоматериков Лавразии и Гондваны [Красный, 2000; Турченко, 2022]. (Di – алмазы).

Fig. 1 Comparative diagram potential value of mineral resources protomainlands Lavrasia and Gondvana [by Krasny, 2000; Turchenko, 2022]. (Di – diamonds).



Литература

Красный Л.И. (Ред.), Геолого-минералогическая карта Мира. Объяснительная записка. Ч.2, Минерально-сырьевые ресурсы континентов и активных транзиталей. Изд. СПб картфабрики ВСЕГЕИ. 2000. 34 с.

Турченко С.И. Металлогения и тектоническая эволюция протоматериков Лавразия и Гондвана в докембрии. Труды Карельского научного центра Российской Академии Наук. 2022. №2. С.5-32.

Snyder G.A., Borg L.E., Nyquist L.E., Taylor L.A. Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution // The origin of the Earth and Moon. Univ. of Ariz. Press: 2000. P. 361-395.



КОЛЛИЗИОННЫЙ ОРОГЕНЕЗ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ: СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТЕКТОНИКА ПРИРОДНЫХ ОРОГЕНОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Щипанский

Геологический институт РАН, Москва, Россия, shchipansky@mail.ru

Детально рассматривается глубинная тектоника палеопротерозойского коллизионного Волго-Донского орогена Восточно-Европейского кратона, реконструкция которого свидетельствует о том, что он представляет собой слабо эродированную орогеническую постройку дивергентной архитектуры. Она сложена преимущественно ювенильными метаосадками, фазы ее развития хорошо сопоставляются с историей становления Гималайско-Тибетского коллизионного орогена, но не согласуются с представлениями о “горячем/ультра-горячем” стиле орогенеза в раннем докембрии, базирующимися, прежде всего, на результатах численного моделирования.

Ключевые слова: ранний докембрий, литосфера, ороген, коровая архитектура, коллизия

COLLISIONAL OROGENESIS AT PALEOPROTEROZOIC: TECTONICS OF NATURAL OROGENS VS. NUMERICAL MODELS

A.A. Shchipansky

Geological Institute of the RAS, Moscow, Russia

We consider in detail the deep tectonics of the Paleoproterozoic Volgo-Don collisional orogen in the East-European Craton. Its reconstruction suggests that this fold-and thrust belt represents a slightly eroded divergent orogenic building filled mostly with juvenal metasediments and comprises well-preserved patterns of the crustal orogenic architecture which are characteristic of the archetypal Himalayan-Tibet collisional orogen which are characteristic of the archetypal Himalayan-Tibet collisional orogen rather than being explored through a number of numerical modeling on hot/ultra-hot Precambrian orogens.

Key words: early Precambrian, lithosphere, orogen, crustal architecture, collision

Механизм раннедокембрийской орогении остается дискуссионной проблемой. Существуют две точки зрения. Первая находит параллели между современными и древними стилями орогенеза. Вторая основывается на существенных их различиях, обусловленных более высоким тепловым потоком ранней Земли, что может объяснять широкое распространение высоко-метаморфических пород в раннем докембрии. Однако, хорошо известно, что раннедокембрийские кратоны подстилаются мощными, 200-300 км, килиями холодной субконтинентальной деплетированной мантии. Роль подобной литосферы в процессах древнего коллизионного орогенеза остается малоизученной. Восточно-Европейский кратон (ВЕК) состоящий из трех главных коровых сегментов, Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии, сшитыми между собой палеопротеройскими орогеническими поясами [Gorbachev, Bogdanova, 1993], предоставляет возможность прояснить механизмы формирования последних с целью ответить на вопрос о том были ли эти процессы схожими с современными, или же они радикально различались. Ключевым объектом исследования для такого рода этого исследования стал Волго-Донской ороген (ВДО), впервые выделенный Е.В. Бибиковой и др. [2009], который сшивает Сарматский и Волго-Уральский сегменты, подстилаемые архейскими мощными (200–300 км) мантийными килиями [Artemieva, 2007]. Выбор этой структуры был обусловлен тем, что, во-первых, через этот ороген в крест его простирались были пройдены два сейсмических профиля – трансект ГСЗ Гранит и МОВ-ОГТ вибро-сейсмический трансект высокого качества 1-ЕВ. Это позволяет раскрыть глубинную архитектуру коры и верхней мантии орогена, как и его соотношения с форландовыми областями архейских континентальных блоков – Сарматии и Волго-Уралии. Во-вторых, многочисленные изотопно-геохимические данные, полученные по породам из керна скважин как хинтерленда (ядра) орогена, так его форландовых областей позволяют выяснить временные ограничения фаз динамики формирования орогена, что необходимо для его

сравнительного анализа с тектонотипом коллизионного современного орогена, коим общепризнано рассматривается Гималайско-Тибетский ороген (ГТО).

Анализ сейсмических профилей показал: (1) глубинная структура ВДО демонстрирует дивергентную архитектуру его устройства с областью смены вергентности с запада на восток (точкой сингулярности) в районе Терсинского пояса; (2) в этой же области происходит резкая смена границ кора – верхняя мантия, выражающаяся в развитии детачмента в восточной части орогена, что отсутствует в его западной части; (3) границы кора – верхняя мантия в Сарматской и Волго-Уральской части орогена также сильно различаются, в первом случае граница плоская, во второй она ундулирует с длиной волны около 100 км; (4) в районе Терсинского пояса по данным ГСЗ появляется линза корово-мантийной смеси, которая на протяжении всего транс-регионального профиля “Гранит” еще выделяется только под Уральским орогеном. В совокупности эти данные указывают на то, что конвергенция Волго-Уральской и Сарматской литосферных плит включала в себя различные геодинамические процессы и была диахронной. Это не может быть объяснено в рамках представлений о каком-либо одном главном триггере ответственным за горячий/ультра-горячий орогенез в раннем докембрии, обусловленный, например, более горячей мантией ранней Земли [Sizova et al., 2005; Perchuk et al., 2018].

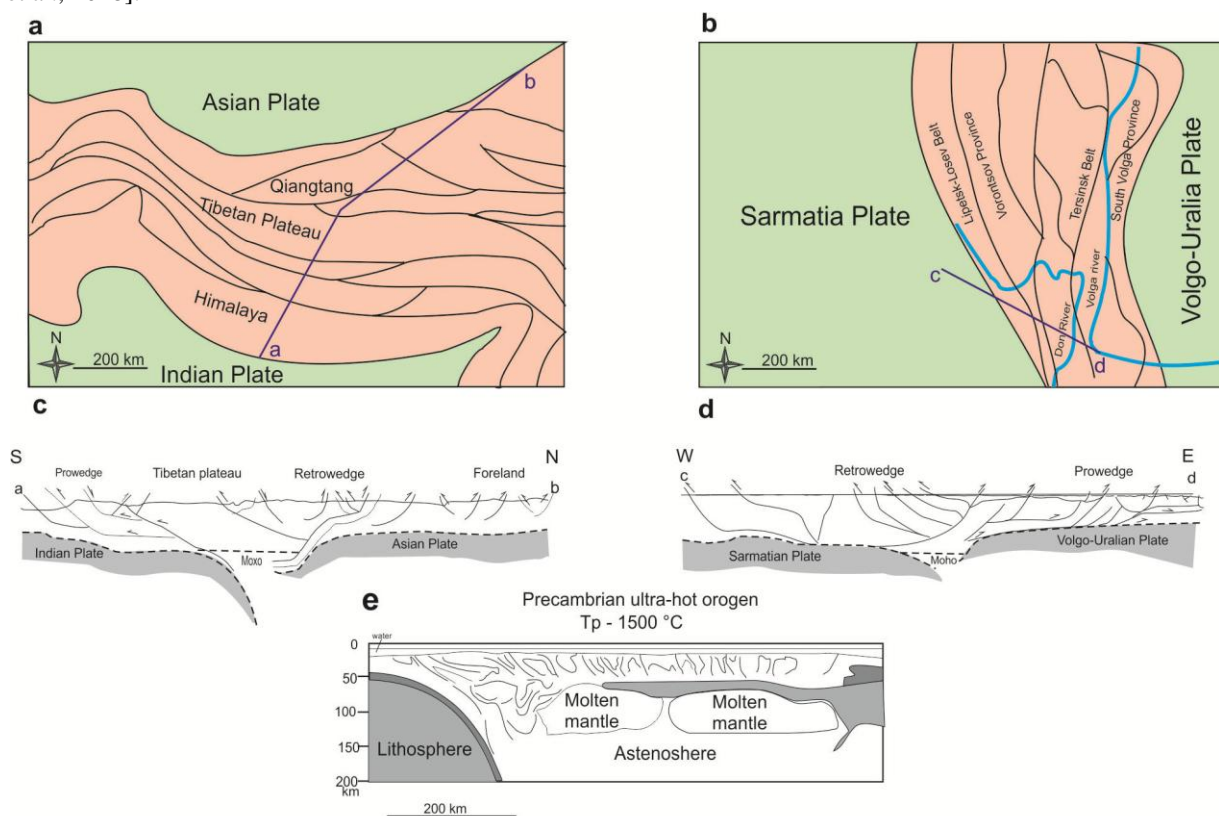


Рис.1. Сравнительные характеристики природных ороенов и орогена по результатам численного моделирования. (a-b) Сравнение размеров Гималайско-Тибетского и Волго-Донского ороенов. Как можно видеть, ширина и характер структуры обнаруживают заметное сходство. (c-d) Схематические геологические разрезы Гималайско-Тибетского и Волго-Донского ороенов. (e) Докембрийский ультра-горячий ороеген по результатам численного моделирования [Perchuk et al., 2018].

Fig.1. Natural vs. model orogens. (a-b). A comparison in size and structural patterns between the Himalayan-Tibetan and Volgo-Don orogens. As is evident, the both orogens have the same width. (c-d) Schematic geologic cross-sections across the Himalayan-Tibetan Orogen and the Volgo-Don Orogen. (e) Result of numerical modeling on Precambrian ultra-hot orogen [Perchuk et al., 2018].

Напротив, имеющиеся данные по глубинной тектонике, результатам изотопно-геохимических исследований и метаморфизма ВДО хорошо описываются в рамках современной теории коллизионного орогенеза, в основе которой лежат данные по ГТО [Jamieson, Beaumont, 2013]. Уникальной для раннего докембрия характеристикой ВДО является его формационное наполнение терригенными, преимущественно ювенильными, палеопротерозойскими метаосадками воронцовской провинции на западе, и южно-волжской провинции на востоке. Однако, для современных орогенов, включая ГТО, терригенные слабо рециклированные осадочные породы являются доминирующей литологией, а окна высоко метаморфизованных пород находятся в резко подчиненном объеме. Как можно видеть на рис.1 по своим размерам ВДО возраста около 2 млрд лет вполне сопоставим с ГТО. Геодинамические фазы развития этих орогенов также обнаруживают значительные сходства. Начало развития ГТО фиксируется раннем мелу появлением активной континентальной окраины Андийского типа, которая существовала в северной части Тибетского плато. Подобная окраина начала развиваться на восточной окраине Сарматии ~ 2.1 млрд лет с накоплением мощного аккреционного клина воронцовской терригенной провинции, которая известна как Восточно-Сарматский ороген [Щипанский и др., 2007]. Активное вступление в коллизию Индийской плиты произошло в раннем эоцене, и эти процессы, включающие несколько импульсов метаморфизма, продолжаются до настоящего времени. Начало коллизии Сарматской и Волго-Уральской плит произошло, по-видимому, ~ 2.0 млрд лет и закончилось ~ 1.95 млрд лет. Таким образом, длительность коллизионных событий в обоих случаях в первом приближении является одинаковой. Это свидетельствует о том, что плейт-тектонические процессы в палеопротерозое, приводящие к коллизионному орогенезу, не сильно отличались от современной геодинамики.

Подобный вывод недавно был сделан на основании сравнительного анализа коллизионного орогенеза в истории Земли, где в качестве референтной модели использовался также ГТО [Weller et al., 2012]. ВДО не входил в этот анализ, но он является объектом, еще более сохранившимся от последующих эрозионных процессов, и, следовательно, может рассматриваться как непосредственный палеопротерозойский аналог ГТО.

Благодарности и источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ГИН РАН АААА-А20-120030690018-2.

Литература

- Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В. и др. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракrustальных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геологическая корреляция. 2015. № 6. С. 3–16. <https://doi.org/10.1134/S086959380906001X>
- Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.А. Геодинамика восточной части Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 1. С. 43–70. <https://doi.org/10.1134/S0016852107010050>
- Artemieva, I.M. Dynamic topography of the East European Craton: shedding light upon the lithospheric structure, composition and mantle dynamics. // Global and Planetary Change. 2007. V. 58. С. 411–434. [doi:10.1016/j.gloplacha.2007.02.013](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.013)
- Gorbatshev, R., Bogdanova, S. Frontiers in the Baltic Shield // Precambrian Research. V. 64. P. 3–21.
- Jamieson, R. A., Beaumont, C. On the origin of orogens // Geological Society America, Bulletin. 2013. V. 125. P. 1671–1702. <https://doi.org/10.1130/B30855.1>
- Perchuk, A. L., Safonov, O. G., Smit, C.A., et al. Precambrian ultra-hot orogenic factory: Making and reworking of continental crust // Tectonophysics. V. 746. P. 572–586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.041>
- Sizova, E., Gerya, T., Brown, M., 2014. Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision // Gondwana Research. 2005. V. 25. P. 522–545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.011>
- Weller, O. M., Mottram C. M., St-Onge, et al. The metamorphic and magmatic record of collisional orogens // Nature Reviews. 2001. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00218-z>



УДК 552.3

**ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ (2.01 И 1.96 МЛРД ЛЕТ) БАЗИТЫ ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ
ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА: СОСТАВ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ**

В.В. Устинова, А.В. Степанова

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия, vikaustinova@yandex.ru

Проведено исследование петрографических и геохимических особенностей интрузивных образований Заонежского полуострова. Палеопротерозойские габбродолериты с возрастом 2.0 и 1.96 млрд лет формируют в этом районе силлы сложной морфологии, которые секут вмещающие осадочные комплексы, относимые к людиковийскому надгоризонту среднего палеопротерозоя. Габбродолериты метаморфизованы в условиях зеленосланцевой – эпидот-амфиболитовой фации, что значительно затрудняет их типизацию и анализ масштабов магматизма каждого из эпизодов. В докладе будут рассмотрены особенности состава породообразующих минералов, а также представлены новые данные о внутреннем строении тел, их соотношении с вмещающими комплексами и химическом составе пород.

Ключевые слова: долериты, палеопротерозой, Онежская структура

**PALEOPROTEROZOIC (2.01 AND 1.96 GA) BASITES OF THE ONEGA STRUCTURE OF THE
FENNOSCANDIAN SHIELD: COMPOSITION AND GEOLOGICAL POSITION**

V.V. Ustinova, A.V. Stepanova

Institute of Geology, Karelian Research Centre of the RAS, Petrozavodsk, Russia

A study of the petrographic and geochemical characteristics of intrusive formations of the Zaonezhsky Peninsula has been carried out. Paleoproterozoic gabbro-dolerites with an age of 2.0–1.96 Ga form sills of complicated morphology in this area, which crosscut the host sedimentary complexes of the Ludukovian Superhorizon of the Middle Paleoproterozoic. Gabbrodolerites are metamorphosed under conditions of greenschist-epidote-amphibolite facies, which complicates their discrimination and analysis of the areal distribution. The composition of rock-forming minerals, as well as new data on the inner structure of sills, their relationships with host complexes and chemical composition will be considered in the presentation.

Keywords: dolerites, paleoproterozoic, Onega structure