

УДК 550.38435:551.71 (470.22)

Н.В. Лубнина¹, А.И. Слабунов², А.В. Степанова³, А.Ю. Бубнов⁴,
Н.И. Косевич⁵, М.А. Новикова⁶, Н.А. Тарасов⁷

ТРЕНД ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПОРОД БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ: ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА⁸

В результате комплексных исследований палеопротерозойских магматических комплексов установлен закономерный тренд перемагничивания. Показано, что фронт перемагничивания распространялся с северо-запада на юго-восток. Полученный тренд перемагничивания, возможно, отражает направление коллизии в палеопротерозое.

Установлена зависимость процессов перемагничивания от состава пород. 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 с их флюидонасыщенностью.

Ключевые слова: Беломорский подвижный пояс, перемагничивание, палеопротерозой, палеомагнетизм, U–Pb-датирование, сфен, рутил.

As a result of integral investigation of the Paleoproterozoic magmatic complexes the trend of remagnetisation has been obtained. The direction of remagnetisation was propagated from North-West to the South-East. Probably, the new trend of remagnetisation reflects the strike of Paleoproterozoic collision.

Correlation between remagnetisation processes and composition of the rocks have been deduced. Probably the extent of keeping of early and late secondary components is caused not only with protolithic composition but with different transformations of the rocks including whose fluid saturation.

Key words: Belomorian Mobile Belt, remagnetization, Paleoproterozoic, paleomagnetism, U–Pb dating, titanite, rutile.

Введение. Под перемагничиванием пород подразумевается процесс, который частично или полностью затушевывает первичную компоненту намагниченности. При палеомагнитных исследованиях традиционно выделяют метакхронную компоненту, вторичную природу которой доказывают на основании тестов палеомагнитной надежности. При этом время приобретения породами вторичной компоненты намагниченности оценивается по сопоставлению либо с фанерозойской траекторией кажущейся миграции полюса, либо с полученными ранее докембрийскими ключевыми полюсами для этого тектонического блока. Однако при таком подходе определить время фиксации метакхронной компоненты намагниченности и связать ее обра-

зование с определенной стадией тектонического процесса не представляется возможным. Вместе с тем в последнее время активное развитие изотопных методов сделало возможным датировать различные наложенные процессы. В частности, U–Pb-датирование циркона, сфена, монацита и рутила из полиметаморфических комплексов позволяет определить возраст и реконструировать последовательность и условия метаморфических преобразований.

В многочисленных публикациях показано, что разнообразные по составу породы, содержащие различные минералы-носители намагниченности, могут перемагничиваться по-разному [Zwing, 2003], а также ссылки в этой работе. Нами пред-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор; *e-mail:* natalia.lubnina@gmail.com

² Институт геологии Карельского научного центра РАН, лаборатория петрологии и тектоники, зав. лабораторией; *e-mail:* slabunov@krc.karelia.ru

³ Институт геологии Карельского научного центра РАН, лаборатория петрологии и тектоники, вед. науч. с.; *e-mail:* sa07@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, науч. с.; *e-mail:* bubnover@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ассистент; *e-mail:* nkosevich@googlemail.com

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ст. науч. с.; *e-mail:* mari_1989@mail.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, студент; *e-mail:* rigomen@inbox.ru

⁸ Работа выполнена за счет гранта РФФИ (проект № 15-05-00731), гранта РНФ (проект № 14-50-00029) и на приборах, закупленных по Программе развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

принята попытка скоррелировать время вторичных преобразований пород и образования вторичных компонент намагниченности на локальном участке, где совмещены разные по возрасту и составу комплексы: архейские эклогиты, палеопротерозойские габбронориты и высокожелезистые долериты, которые одновременно претерпели две стадии высокотемпературных метаморфических преобразований. В качестве базового полигона был выбран о. Воротная Луда в центральной части Беломорского подвижного пояса (Гридинское дайковое поле). Также в работе предпринята попытка оценить синхронность процессов перемагничивания в разновозрастных и одинаковых по составу породах, расположенных в разных частях Беломорского подвижного пояса.

Ранее на основании изотопного датирования U–Pb-методом сфенов и рутилов было показано, что в пределах Беломорского подвижного пояса установлено омоложение возраста наложенных процессов [Слабунов, 2008]. Изотопные данные свидетельствуют о закономерном уменьшении возраста сфенов от 1,92 млрд лет в северо-восточной части Беломорского подвижного пояса на границе с Лапландско-Кольским орогеном до 1,80 млрд лет в его юго-западной части на границе с Карельским кратоном [Бибикина и др., 1999б]. На границе с Карельским кратоном возраст сфенов резко меняется с 1888 млн лет до 2540–2683 млн лет [там же]. В то же время возраст рутилов в породах Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса колеблется в интервале 1760 ± 20 млн лет [Слабунов, 2008]. В породах Карельского кратона возраст сфенов лежит в интервале 2,87–2,65 млрд лет, это означает, что Карельский кратон не испытал с 2,65 млрд лет назад термальное воздействие выше 650–700 °C [Бибикина и др., 1999а]. Считается, что температура закрытия сфена составляет ~700 °C, в то время как температура закрытия рутила — ~450 °C, что наиболее близко блокирующим температурам среднетемпературных компонент намагниченности, т.е. изотопный возраст рутила, скорее всего, маркирует время приобретения породами среднетемпературной метакристаллической компоненты намагниченности.

Объекты исследований расположены в пределах Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита. Эта крупная структура расположена между Карельским архейским кратоном и палеопротерозойским Лапландско-Кольским коллизионным орогеном (гранулитогнейсовым поясом) [Ранний докембрий..., 2005; Слабунов, 2008]. Многие исследователи рассматривают Беломорский подвижный пояс как форланд Лапландско-Кольского орогена, а его тектоническую структуру как суперпозицию неоархейских и палеопротерозойских тектонических процессов.

Беломорский подвижный пояс (БПП) сложен главным образом мезо- и неоархейскими

гранитогнейсовыми, 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 Беломорского подвижного пояса 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 назад [Слабунов и др., 2016].

Характерная особенность Беломорского подвижного пояса — широкое распространение в его пределах палеопротерозойских интрузивных образований, возраст которых варьирует от 2,50 до 2,12 млрд лет [Stepanova, Stepanov, 2010]. Среди палеопротерозойских интрузивных комплексов БПП установлены дайки и довольно крупные интрузивы (Ковдозерская и Кийостровская интрузии), но наиболее характерными и преобладающими являются мелкие тела неправильной формы. Дайки среди базитов БПП встречаются редко. Характерная морфологическая особенность палеопротерозойских базитов Беломорского подвижного пояса — тектонизированные контакты, расланцованные породы эндоконтактной части, расланцевание в которых субсогласно с гнейсовидностью вмещающих пород.

Палеопротерозойские базиты Беломорского подвижного пояса включают несколько возрастных групп, среди которых наиболее распространены дайки и малые интрузии комплекса лерцолитов–габброноритов [Степанов, 1981], время формирования которого оценивается в 2,43–2,39 млрд лет назад [Stepanova, Stepanov, 2010] и ссылки в этой работе. Породы лерцолит-габброноритового 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 базитов, широко распространенная в Беломорском подвижном поясе, — 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 Беломорском подвижном поясе не сохраняют (или крайне редко сохраняют) реликты первичных минералов и преобразованы в гранат-клинопироксеновые апогаббровые амфиболиты, но в них часто диагностируются реликты магматических структур. Железистые габброиды в Беломорском подвижном поясе распространены несколько меньше, чем породы комплекса лерцолитов-габброноритов,

но установлены на всей его площади. В Беломорском подвижном поясе установлены и другие палеопротерозойские базиты, отличающиеся по составу и относительному геологическому возрасту от описанных выше, но они не датированы и/или распространены ограниченно [Stepanova, Stepanov, 2010] и ссылки в этой работе.

Степень метаморфических преобразований в палеопротерозойских базитах БПП варьирует от эклогитовой фации [Березин, Скублов, 2014; Слабунов и др., 2011] до умереннобарической амфиболитовой фации [Ранний докембрий..., 2005]. Наиболее интенсивно метаморфизованные габброиды установлены на побережье Белого моря в районе с. Гридино (Керетский архипелаг) и в районе пос. Салма (Кольский п-ов, оз. Бабинская Имандра). Наименее интенсивно метаморфизованные габброиды установлены вблизи границы с Карельским кратоном. В этой зоне породы часто сохраняют реликты первичных минералов, а метаморфические преобразования в них выражены в виде тонких реакционных кайм граната и амфибола.

Для определения пространственного распределения вторичных компонент намагниченности были детально изучены объекты вдоль траверса Апатиты–Петрозаводск, который пересекает Беломорскую провинцию с северо-востока на юго-запад под острым углом (рис. 1) и в Южном Беломорье на островах Онежской губы Белого моря между г. Беломорск 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 наиболее детально изученном к настоящему времени районе Беломорского подвижного пояса (с. Гридино), на территории которого установлено несколько возрастных генераций эклогитов, различающихся как по времени формирования эклогитовых парагенезисов (архейских и палеопротерозойских [Володичев и др., 2004; Слабунов и др., 2011]), так и по составу и возрасту протолитов.

Методы исследований. Лабораторная обработка коллекций выполнена в петромагнитной лаборатории кафедры динамической геологии МГУ имени М.В. Ломоносова по стандартной методике. Для определения минералов-носителей намагниченности в породе изучена непрерывная зависимость магнитной восприимчивости от температуры в отсутствие внешнего магнитного поля на приставке-печи CS-3 («AGICO», Чехия). Измерения проводили до температуры 700 °С в поле 300 мТл. Измерения остаточной намагниченности в процессе температурных чисток выполняли на спин-магнитометре JR-6A («AGICO», Чехия). Для температурного размагничивания образцов

использована немагнитная печь TD48 («ASC Scientific», США) с величиной некомпенсированного поля не более 5–10 нТ.

Все образцы подвергнуты детальному ступенчатому температурному размагничиванию до температур точек Кюри для минералов-носителей намагниченности в исследуемых образцах. Число шагов температурной чистки варьировало от 10 до 20. Температурная чистка проводилась до полного размагничивания образцов или до того момента, когда величина намагниченности становилась соизмеримой с уровнем чувствительности измерительного прибора ($n \cdot 10^{-5}$ А/м). Для контроля над возможными вторичными изменениями основных минералов-носителей намагниченности в ходе лабораторного нагрева измеряли магнитную восприимчивость после каждого шага чистки. Измерения прекращали, если значения магнитной восприимчивости увеличивались в 2 раза и более. Чистка также прекращалась в случае хаотичного поведения вектора естественной остаточной намагниченности (ЕОН) в ходе нагрева.

Результаты ступенчатой температурной чистки образцов сопоставляли с данными магнитной чистки переменным магнитным полем контрольной группы образцов. Размагничивание проводили на приборе LDA-3A-AF («AGICO», Чехия) с диапазоном напряженности переменного поля от 1 до 100 мТ. Общее число шагов магнитной чистки до 15. Для проведения компонентного анализа [Kirschvink, 1980] использованы программы Remasoft 3.0 и PMGSC. Компонента считалась выделенной, если не менее 3 точек (шагов чистки) лежали на одной прямой на диаграмме Зийдervельда [Zijderveld, 1967].

Для каждой компоненты, выделенной в определенном температурном спектре, рассчитывали средние направления с учетом статистических параметров — кучности (K) и радиуса доверия (α_{95}). Среднее направление для каждой компоненты намагниченности рассчитывали как по отдельным сайтам, так и по образцам в целом. Время приобретения породами намагниченности оценивали на основании тестов палеомагнитной надежности (теста контакта и обращения). С каждого среднего направления пересчитаны координаты палеополлюсов на координаты точек отбора образцов.

Результаты исследований. Для определения пространственного распределения разновозрастных метакронных компонент намагниченности в разновозрастных породах в пределах Беломорского подвижного пояса детально опробованы близкие по составу палеопротерозойские комплексы лерцолит-габброноритов вдоль траверса от оз. Бабинская Имандра до о. Бережной в Онежской губе (рис. 1, 2).

В ходе детального терморазмагничивания и чистки переменным полем образцов палеопротерозойских габброноритов выделены 2 компоненты

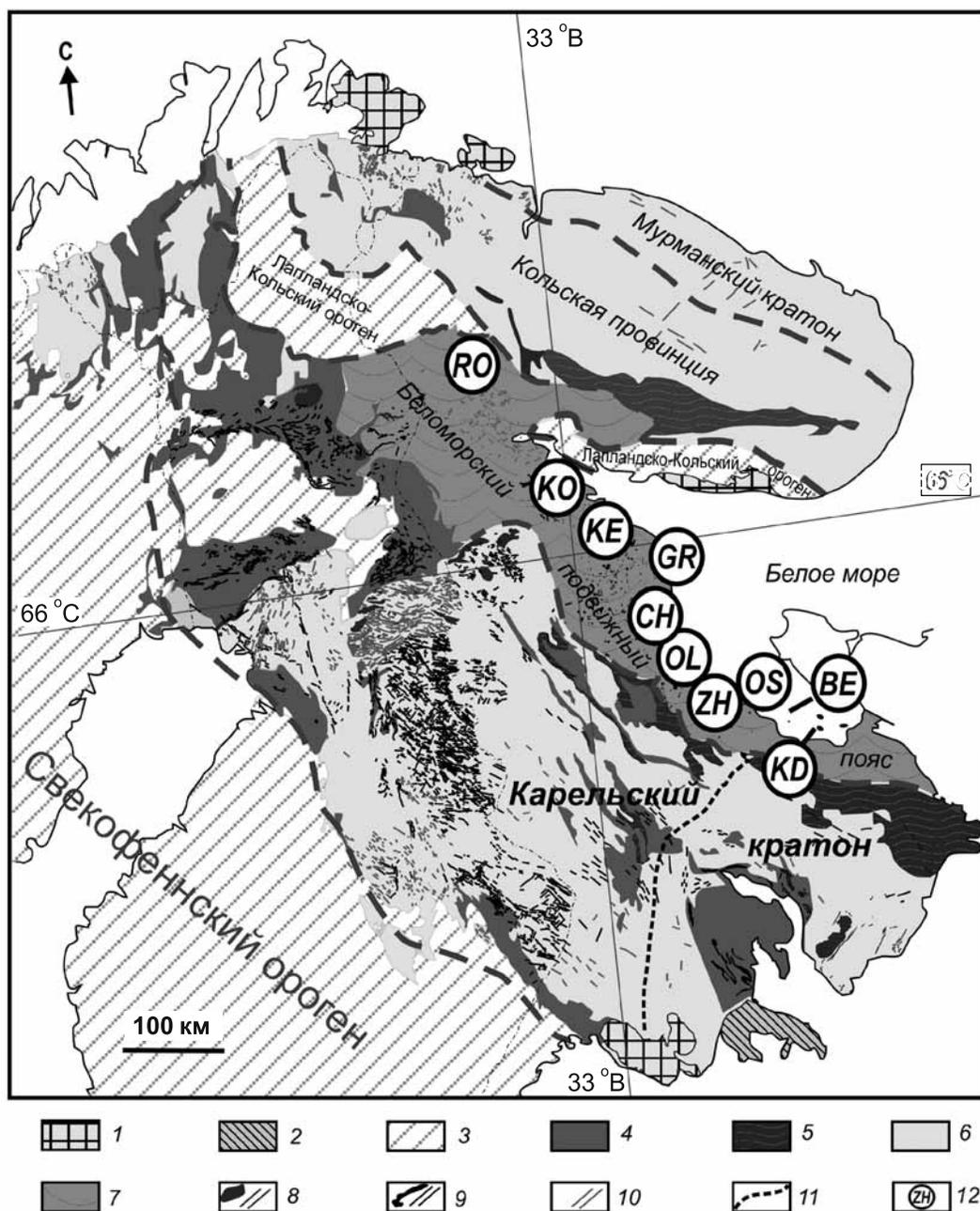


Рис. 1. Геологическая схема района работ, по [Слабунов, 2008], с добавлениями. Буквами обозначены точки палеомагнитного образования: VE — о. Бережной; CH — оз. Северное Хаттомозеро; GR — Гридинское дайковое поле, о. Воротная Луда; KD — о. Кондостров; KE — оз. Варацкое, р. Кереть; KO — с. Ковда; OL — р. Олонга; OS — о. Осинки; RO — оз. Бабинская Имандра, о. Роватостров; ZH — пос. Шижня

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 Свеккофеннский 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 — объекты палеомагнитных исследований

намагниченности. Направление низкотемпературной компоненты совпадает с направлением современного геомагнитного поля в районе работ, в дальнейшем она была исключена из рассмотрения. Высокотемпературная/высококоэрцитивная компонента имеет блокирующие значения температуры до 560–590 °C и поля до 40–100 мТ. Компонента имеет преимущественно север-северо-западное

склонение и умереннонизкое положительное наклонение (рис. 3). Среднее направление этой компоненты в географической системе координат для каждого объекта приведено в табл. 1. Отметим, что по мере смещения с северо-запада (от границы с Лапландско-Кольским орогеном) на юго-восток (к Карельскому кратону) склонение меняется от северо-западного на северо-восточное.

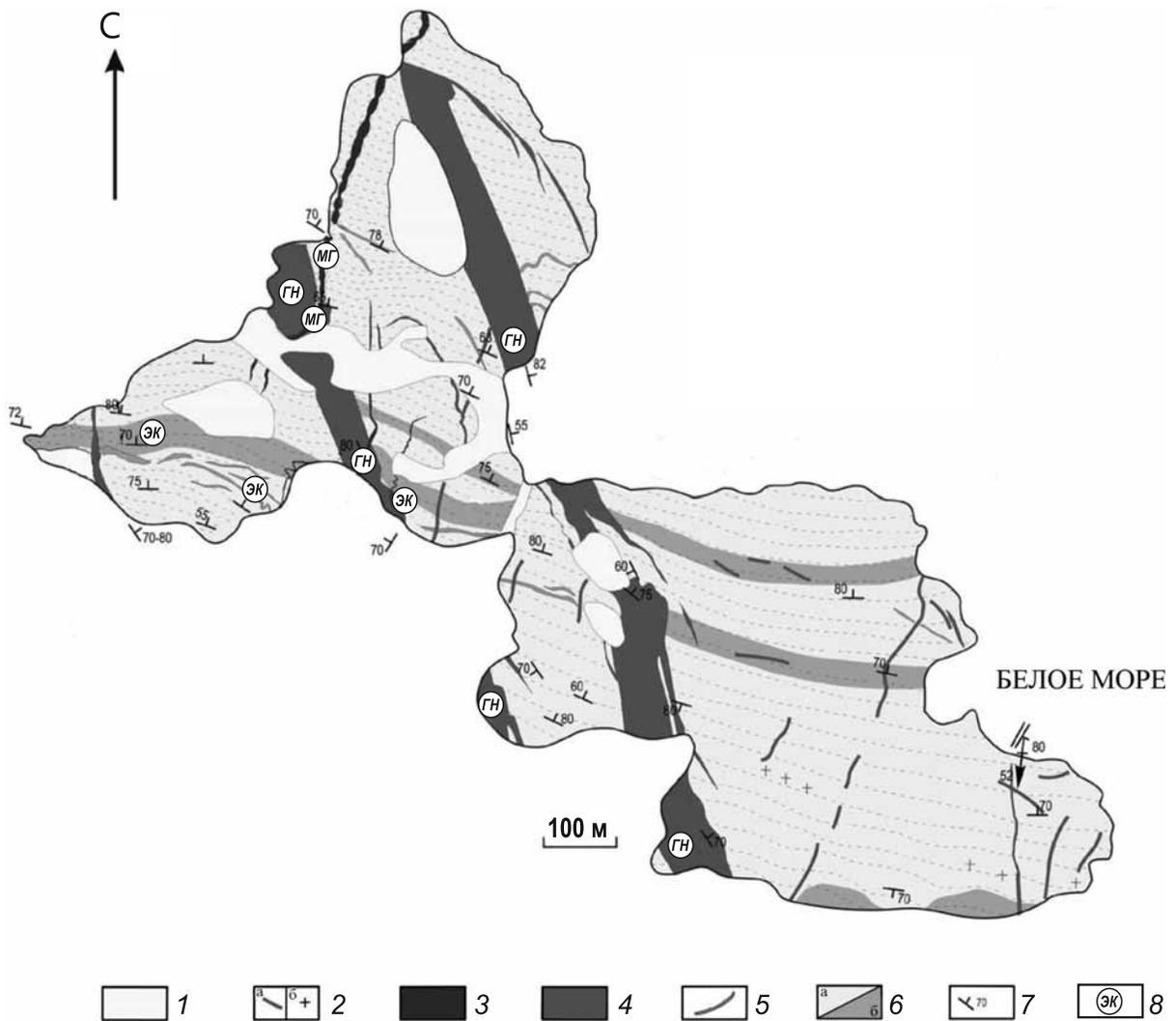


Рис. 2. Геологическая схема о. Воротная Луда, по [Гранулитовые и эклогитовые..., 2011], с указанием точек палеомагнитного опробования: 1 — четвертичные отложения; 2 — дайки гранитоидов (а — аплиты, б — граниты); 3 — метагаббро; 4 — оливиновый габброноритовый комплекс; 5 — Mg-толеиты; 6 — архейские эклогиты (а — с низким содержанием включений, б — с высоким содержанием включений); 7 — элементы залегания; 8 — точки палеомагнитного опробования

Образцы габброноритов, отобранные из дайки на о. Кондостров, содержат две метакристаллические компоненты намагниченности. Первая KDA-компонента восток-северо-восточного склонения и умеренного положительного наклона выделяется в интервале температуры 50–250 °C и переменного поля 3–15 мТл (рис. 3, к–м). Вторая KD-компонента намагниченности север-северо-западного склонения и умеренного положительного наклона имеет спектр блокирующих температур до 590 °C и переменных полей до 100 мТл (рис. 3, к–м). Обе компоненты монополярны. По мере продвижения к центральной части габброноритового тела уменьшается степень амфиболитизации. Одновременно с этим в исследованных образцах закономерно уменьшается и доля KD-компоненты, в центральной части тела удалось выделить только одну высокотемпературную компоненту намагниченности север-северо-западного склонения и умеренного положительного наклона. Среднее направле-

ние выделенных KD-компонент намагниченности приведены в табл. 1.

В образцах габброноритов, отобранных на о. Осинки и в районе пос. Шижня в Онежской губе, в интервале температуры до 575–590 °C и переменного поля до 80–100 мТл выделяются соответственно высокотемпературные OS- и ZH-компоненты намагниченности юг-юго-западного склонения и низкого отрицательного/положительного наклона (рис. 3, н–т). На основании значений спектра блокирующей температуры и данных термомагнитного анализа основной минерал-носитель намагниченности в этих породах представлен магнетитом. Средние направления OS- и ZH-компонент намагниченности представлены в табл. 1.

Для оценки степени сохранности вторичных компонент намагниченности в разных по возрасту и составу породах, одновременно претерпевших две стадии высокотемпературных метаморфических преобразований, детально опробованы архей-

Таблица 1

Палеомагнитные направления для палеопротерозойских комплексов Беломорского подвижного пояса

Номер п/п	Точка отбора	Объект	Компонента	N	Направление				Возраст пород, млн лет
					Dec °	Inc °	K	α_{95} °	
Северная часть Беломорского подвижного пояса оз. Бабинская Имандра									
1	RO	о. Роватостров	PO	20	262	57,5	17,1	8,1	2450
с. Ковда									
2	KO	с. Ковда	KO	16	314,0	47,8	58,3	4,9	2450
р. Кереть									
3	KE	р. Кереть	KE	13	23,2	49,2	32,2	7,4	2450
Центральная часть Беломорского подвижного пояса, Гридинское дайковое поле									
Вмещающие эцлогиты (ЭК на рис.2)									
4	GR	о. Воротная Луда	GR1	14	354,5	37,6	44,3	6,3	1980 (?)
5			PR1	14	28,6	60,5	30,0	7,4	1980(?)
Дайки оливиновых габброноритов (ГН на рис. 2)									
6	GR	о. Воротная Луда	GR2	23	336,8	47,2	70,9	3,6	1880
7			GR2S*	23	13,4	-21,8	6,1	13,4	1880 (?)
8	GR	о. Воротная Луда	PR2	28	37,9	58,0	33,7	4,8	1980
9			PR2S*	28	23,7	18,9	9,6	9,3	1980
Дайка метагаббро (МГ на рис. 2)									
10	GR	о. Воротная Луда	GR3	25	332,8	48,9	58,4	3,8	1880
Южная часть Беломорского подвижного пояса									
11	CH	о. Северное Хатгамозеро	CH	14	22,3	56,0	21,1	8,9	2450
12	OL	р. Олонга	OL	10	13,8	52,0	17,7	11,8	2100
13	ZH	пос. Шижня	ZH	15	183,6	3,5	28,2	7,3	2450
14	OS	о. Осинки	OS	22	9,4	15,7	35,6	10,3	2450
15	BE	о. Бережной	BE	15	356,3	39,3	39,9	6,1	2450
16	BE2	о. Бережной	BE2	20	357,6	50,3	17,9	7,9	2450
17	KD	о. Кондостров	KD	19	355,9	40,6	39,8	5,4	2450

Примечание: N — число образцов; Dec°, Inc° — склонение и наклонение средних направлений компонент в географической системе координат; K — кучность векторов; α_{95} — радиус круга доверия при 95%-ной вероятности для среднего направления. Звездочкой отмечены палеомагнитные направления, исключенные из дальнейшего анализа.

ские эцлогиты, палеопротерозойские габбронориты и метагаббро на о. Воротная Луда (Гридинское дайковое поле). В образцах архейских эцлогитов выделяются две метахронные компоненты намагниченности. Первая компонента северо-западного склонения и умеренного положительного наклона (компонента GR1, рис. 4, а–в) выделяется в интервале 250–500 °С, она монополярна. Среднее палеомагнитное направление GR1-компоненты приведено в табл. 1. Высокотемпературная компонента (PR1) выделяется как характеристическая (наиболее стабильная, идущая в начало координат диаграмм Зийдервельда) и имеет деблокирующие значения температуры 510–555 °С (рис. 4, а–в). Для большей части образцов высокотемпературная компонента имеет северо-восточное склонение и умеренное–крутое положительное наклонение (рис. 4, а–в). Среднее палеомагнитное направление выделенных PR1-компонент приведено в табл. 1.

В образцах дайки габброноритов в ходе ступенчатой температурной чистки также выделяются две метахронные компоненты естественной

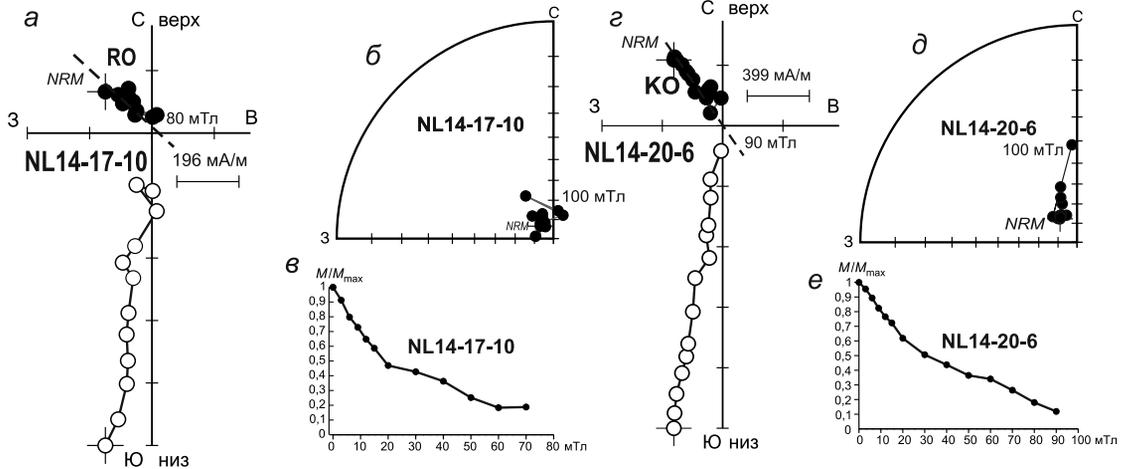
остаточной намагниченности. Первая компонента северо-западного склонения и умеренного положительного наклонения имеет значения блокирующей температуры до 450–510 °С (рис. 4, з–е). Среднее направление этой компоненты приведено в табл. 1. Тест контакта отрицательный, что свидетельствует о послескладчатой природе выделенной компоненты намагниченности [Lubnina et al., 2015].

Вторая метахронная компонента естественной остаточной намагниченности (PR2) выделяется в образцах дайки габброноритов в интервале 510–580 °С (рис. 4, д–е). Данные термоманитного анализа свидетельствуют, что основным минералом-носителем этой компоненты является однодомный магнетит. Среднее направление высокотемпературной компоненты PR2 в современной системе координат приведено в табл. 1. Поскольку среднее направление высокотемпературной компоненты PR2, выделяемой в дайке габброноритов, лежит в пределах доверительного интервала среднего направления высокотемпературной компоненты PR1, выделенной во

СЕВЕРНАЯ ЧАСТЬ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

о. Роватостров, оз. Бабинская Имандра

с. Ковда



ЮЖНАЯ ЧАСТЬ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

о. Бережной, Онежская губа

о. Кондостров, Онежская губа

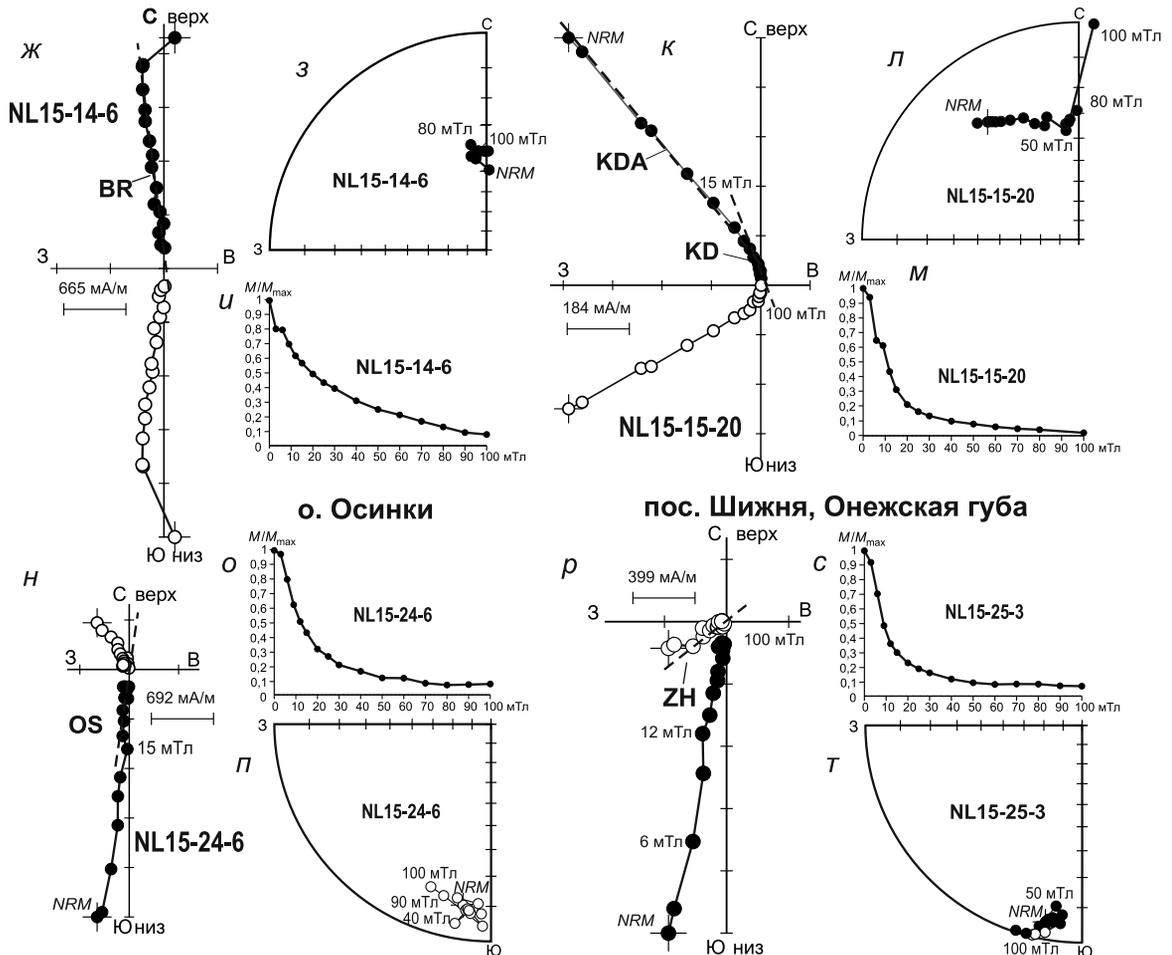


Рис. 3. Примеры чистки переменным полем образцов даек лерцолит-габброноритового комплекса, отобранных в северной (о. Роватостров, оз. Бабинская Имандра и с. Ковда) и южной (о-ва Бережной, Кондостров и Осинки, пос. Шижня) частях Беломорского подвижного пояса. Для каждого образца слева направо: диаграмма Зийдервельда в географической системе координат (а, г, ж, к, н, р), стереопроекция направлений в географической системе координат (б, д, з, л, п, т) и кривая изменения величины естественной остаточной намагниченности в ходе чистки переменным полем (в, е, и, м, о, с). Белые кружки — проекции векторов на верхнюю полусферу (для диаграмм Зийдервельда проекция на вертикальную плоскость), черные кружки — проекции векторов на нижнюю полусферу (для диаграмм Зийдервельда проекция векторов на горизонтальную плоскость). Цифры у кружков — переменное поле, мТл. На диаграммах Зийдервельда буквы — выделенные компоненты (буквенные обозначения компонент см. табл. 1)

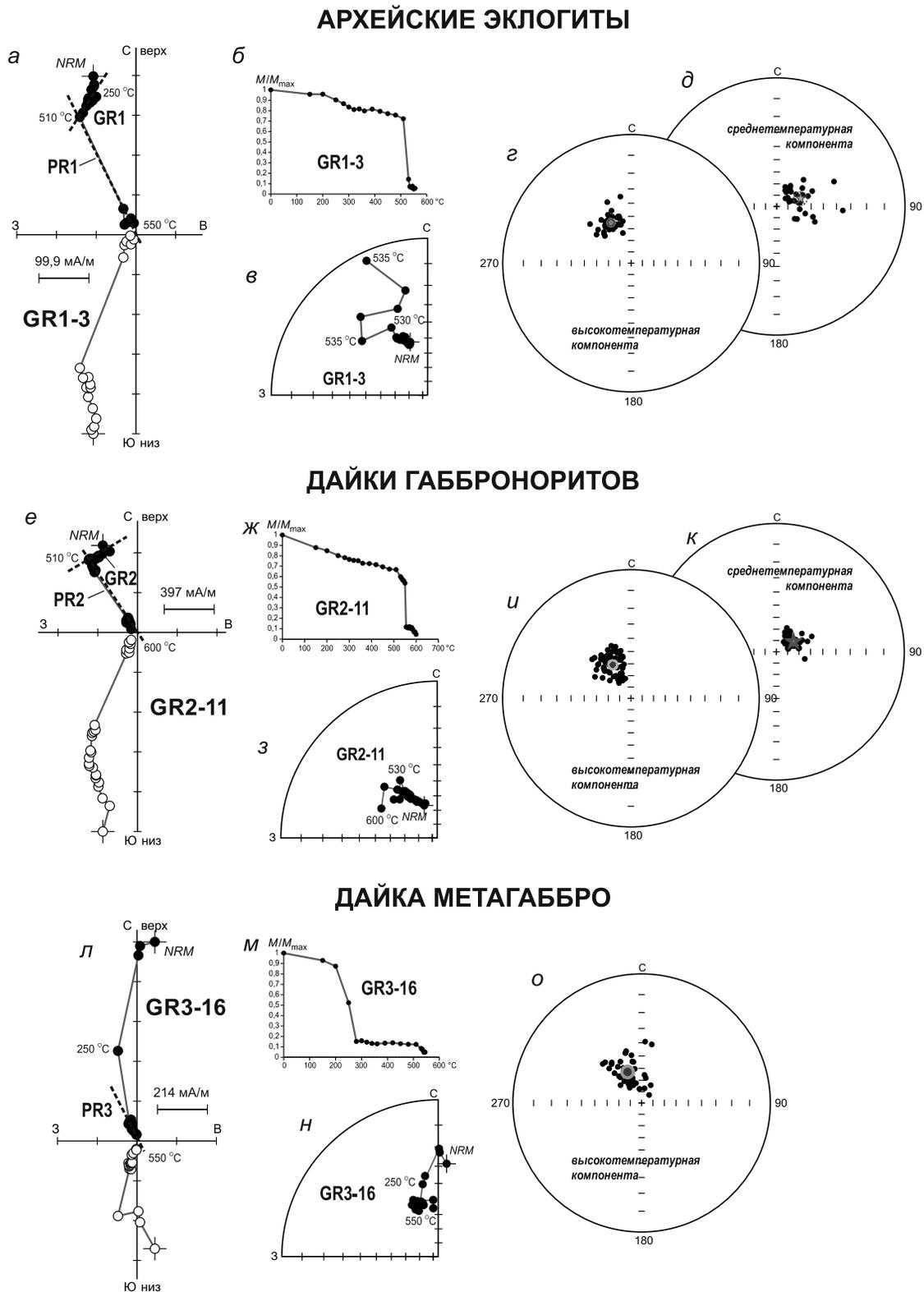


Рис. 4. Примеры ступенчатой температурной чистки палеопротерозойских даек и вмещающих архейских эклогитов, опробованных на о. Воротная Луца (Гридинское дайковое поле): вмещающие архейские эклогиты (а–д); дайки лерцолит-габброноритового комплекса (е–к); дайка высокожелезистых метагаббро (л–о). Для каждого образца слева направо: диаграмма Зидервельда в географической системе координат (а, е, л), кривая изменения величины естественной остаточной намагниченности в ходе температурной чистки (б, ж, м), стереопроекция направлений в географической системе координат (в, з, н), средние направления высокотемпературной (г, и, о) и среднетемпературных (д, к) метакристаллических компонент намагниченности в образцах вмещающих архейских эклогитов и палеопротерозойских даек лерцолит-габброноритового комплекса и высокожелезистых метагаббро соответственно. Белые кружки — проекции векторов на верхнюю полусферу (для диаграмм Зидервельда проекция на вертикальную плоскость), черные кружки — проекции векторов на нижнюю полусферу (для диаграмм Зидервельда проекция векторов на горизонтальную плоскость). Цифры у кружков указывают температуру магнитной чистки, °C. На диаграммах Зидервельда буквы — выделенные компоненты (см. рис. 1 и табл. 1)

Таблица 2

Палеомагнитные полюсы для палеопротерозойских комплексов Беломорского подвижного комплекса

Место отбора	Индекс	Ф, °N	Λ, °E	A ₉₅ , °	φт, °N	Возраст намагниченности, млрд лет	Ссылка
Северная часть Беломорского подвижного пояса							
Оз. Бабинская Имандра, о. Роватостров	RO	31,9	324,4	12,1	54,7	2,10(?)	эта работа
С. Ковда	KO	43,1	270,6	6,3	46,7	1,98(?)	эта работа
Р. Кереть	KE	51,2	180,1	6,5	30,1	1,98(?)	эта работа
Центральная часть Беломорского подвижного пояса							
Гридинское дайковое поле, о. Воротная Луда	PR	47,2	218,3	5,7	21,1	1,98	[Lubnina et al., 2015]
Гридинское дайковое поле, о. Воротная Луда	GR	40,8	205,4	6,3	12,4	1,88	[Lubnina et al., 2015]
Южная часть Беломорского подвижного пояса							
О. Северное Хатгамозеро	CH	58,1	177,9	9,2	36,5	1,90	эта работа
Р. Олонга	OL	56,7	192,6	11,0	32,6	1,90	эта работа
Пос. Шижня	ZH	23,7	210,9	3,7	1,8	1,77	эта работа
О. Осинки	OS	33,1	204,1	5,4	8,0	1,77	эта работа
О. Бережной	BE	47,9	221,2	4,4	22,3	1,84	эта работа
О. Бережной	BE2	56,7	219,8	7,1	31,1	1,90	эта работа
О. Кондостров	KD	49,1	223,7	4,0	23,2	1,84	эта работа

Примечание: Ф°, Λ° — широта и долгота палеомагнитного полюса соответственно; A₉₅, ° — радиус круга доверия палеомагнитного полюса в градусах; φт, °N — палеоширота (в градусах северной широты).

вмещающих эклогитах, перемагничивание пород произошло после внедрения дайки габброноритов. Отрицательные тесты складки и контакта свидетельствуют о вторичной природе выделенной в габброноритах высокотемпературной компоненты намагниченности.

Для даек высокожелезистых долеритов выделяется только одна высокотемпературная компонента намагниченности север-северо-восточного склонения и умеренно положительного наклона (GR3, рис. 4, з-к). Компонента разрушается в интервале до 555 °С. Среднее направление GR3-компоненты намагниченности в современной системе координат представлено в табл. 1. Тест контакта отрицательный — среднее направление GR3-компоненты намагниченности, выделенной в дайке высокожелезистых долеритов лежит в пределах доверительных интервалов для средних направлений среднетемпературных компонент намагниченности GR-1 и GR-2, выделенных во вмещающих эклогитах и дайке габброноритов, что свидетельствует об их вторичной при-

роде. Перемагничивание пород произошло уже после внедрения даек высокожелезистых долеритов, это показывают отрицательные тесты контакта и складки.

Обсуждение результатов. Палеомагнитные полюсы, пересчитанные с направлений высокотемпературных компонент намагниченности в габброноритах северо-западной части Беломорского подвижного пояса (оз. Бабинская Имандра), значительно отличаются от палеопротерозойских палеомагнитных полюсов Карельского кратона, но наиболее близки таковому Кольского блока — 2,3–2,1 млрд лет (рис. 5, табл. 2). Отрицательный тест контакта свидетельствует об образовании

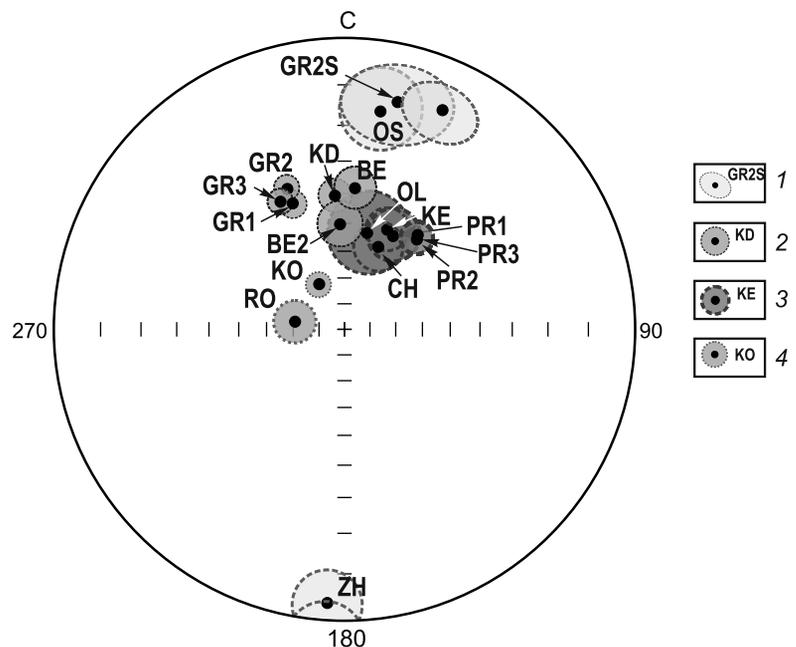


Рис. 5. Распределение на сфере средних направлений выделенных метакронных компонент естественной остаточной намагниченности. Черные кружки — проекция векторов на нижнюю полушару, белые — на верхнюю. Буквенные обозначения компонент намагниченности см. в табл. 1 1 — предполагаемое время перемагничивания пород (1,77 млрд лет назад); 2 — время перемагничивания (1,88–1,84 млрд лет назад); 3 — то же (1,92–1,90 млрд лет назад); 4 — время перемагничивания пород (2,1 млрд лет назад)

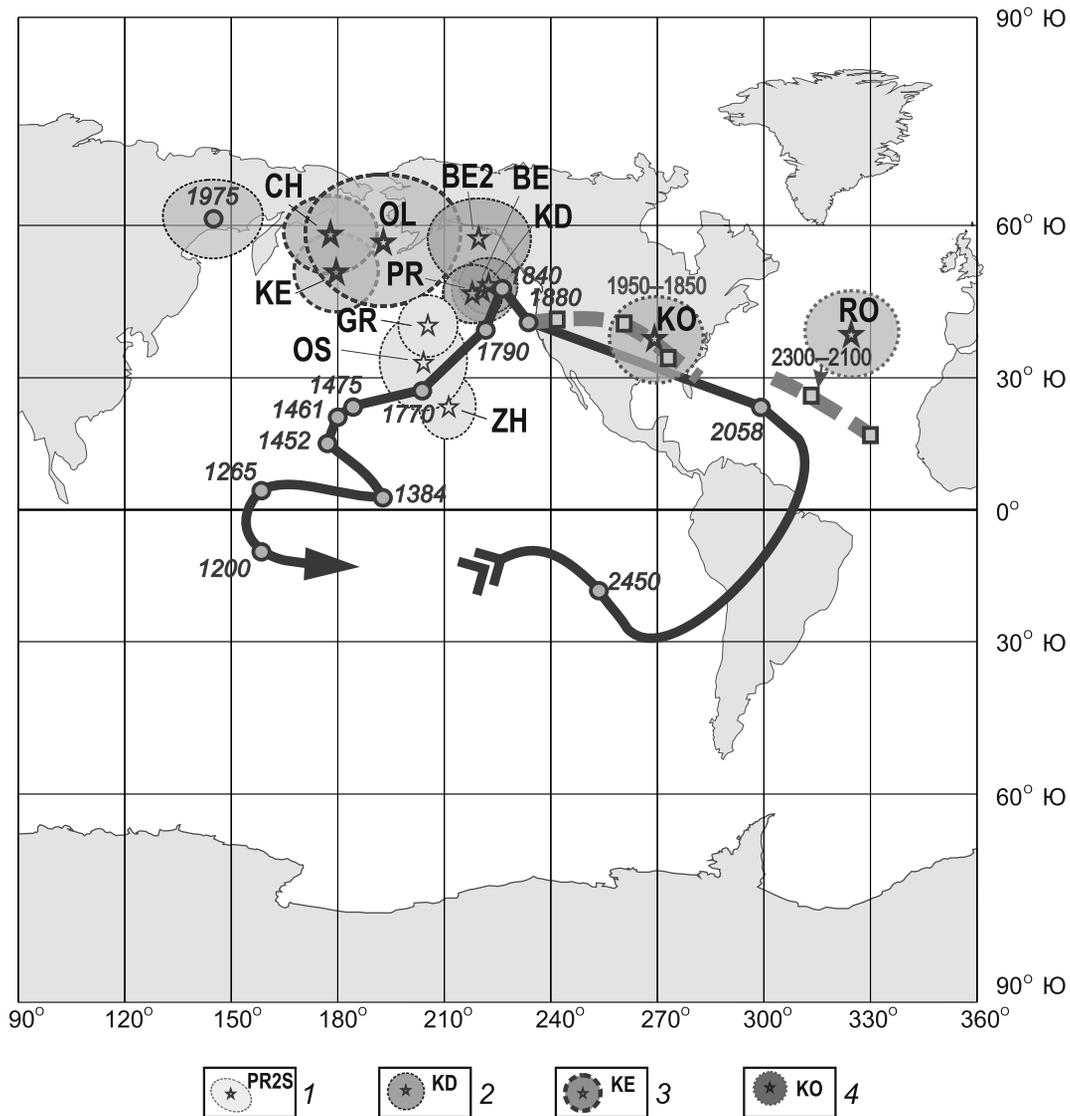


Рис. 6. Сопоставление новых палеомагнитных полюсов, полученных для палеопротерозойских лерцолит-габброноритов и высокожелезистых метагаббро в различных частях Беломорского подвижного пояса с траекторией кажущейся миграции Карельского (темно-серая стрелка) и Кольского (светло-серые пунктирные линии) кратонов в интервале 2,45–1,20 млрд лет, по [Лубнина, 2009] с использованием данных [Buchan et al., 2000; Fedotova et al., 1999]. Звездочками показаны палеомагнитные полюсы, пересчитанные с направлений компонент намагниченности на координаты точек отбора. Буквенные обозначения компонент намагниченности см. в табл. 1

высокотемпературной метакронной компоненты намагниченности уже после внедрения дайки габброноритов. Палеомагнитный полюс, пересчитанный с направления высокотемпературной компоненты, которая выделена в габброноритах в центральной части Беломорского подвижного пояса (с. Гридино), близок палеомагнитному полюсу 1,98 млрд лет назад Карельского кратона (рис. 6, табл. 2).

Палеомагнитный полюс, пересчитанный со среднего направления высокотемпературной компоненты намагниченности PR, лежит в палеопротерозойской части траектории кажущейся миграции полюса (ТКМП) Карельского кратона в интервале 1,90–1,84 млрд лет (рис. 6, табл. 2). Исходя из этих данных мы оцениваем время образования высокотемпературной компоненты намагниченности PR в 1,90–1,84 млрд лет. Палео-

магнитный полюс, пересчитанный с направления среднетемпературной компоненты GR, близок палеомагнитным полюсам 1,79–1,77 млрд лет Карельского кратона (рис. 6). Высокие блокирующие температуры (до 510 °С) минералов-носителей этой компоненты намагниченности позволяют предположить ее образование под воздействием флюидов. Поскольку коллапс сопровождается большим количеством флюидов, воздействие которых может продолжаться в течение десятков миллионов лет после основного этапа коллизии, время образования вторичной метакронной компоненты намагниченности может запаздывать на несколько десятков миллионов лет по сравнению с главной фазой посторогенного коллапса. Следует также отметить, что U–Pb-возраст рутилов в породах Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса составляет 1760 ± 20 млн лет

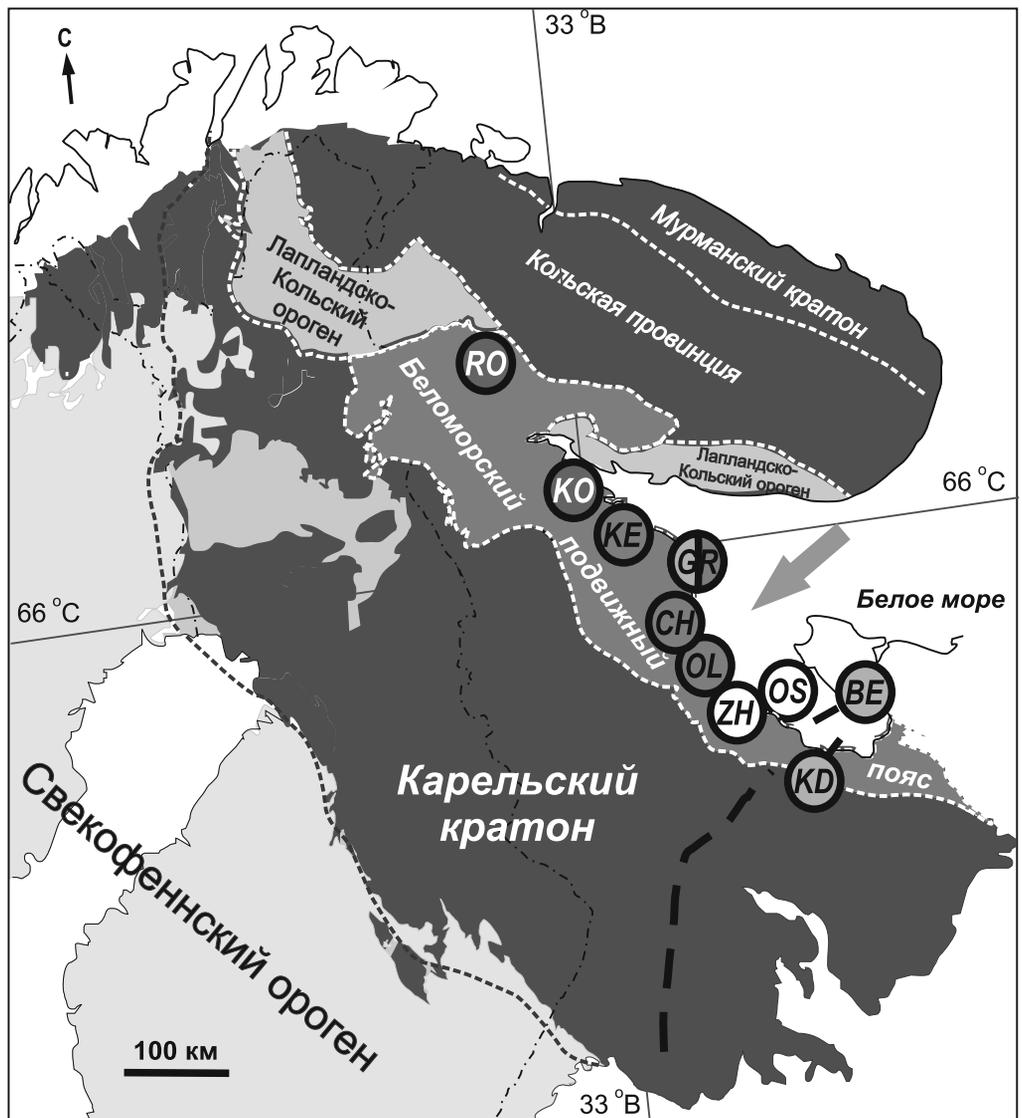
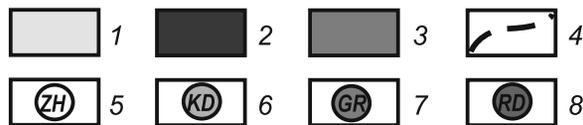


Рис. 7. Предполагаемый тренд перемагничивания пород Беломорского подвижного пояса в палеопротерозое. Стрелкой показано предполагаемое направление коллизии в палеопротерозое: 1 — Лапландско-Кольский и Свеккофеннский орогены, 1,8–2,0 млрд лет; 2 — архейские комплексы Беломорского подвижного пояса; 3 — докембрийские комплексы Карельского и Мурманского кратонов, Кольской провинции; 4 — границы террейнов Карельского кратона; 5–8 — палеопротерозойские палеомагнитные полюсы, пересчитанные со вторичных компонент намагниченности: 5 — 1,77 млрд лет; 6 — 1,88–1,84 млрд лет; 7 — 1,92–1,90 млрд лет; 8 — 2,1 млрд лет



[Слабунов, 2008], что свидетельствует о вторичном термальном воздействии до ~450–500 °C в этом временном интервале [Бибикова и др., 1999а].

В результате проведенных петро-палеомагнитных исследований процессов перемагничивания выделен тренд его омоложения с северо-востока на юго-запад, что хорошо согласуется с результатами изотопного датирования этих же комплексов (рис. 7). Полученный тренд перемагничивания, возможно, отражает направление коллизии в палеопротерозое.

Выводы. 1. Первые данные о перемагничивании пород Беломорского подвижного пояса для близких по составу разновозрастных объектов, расположенных в различных частях Беломорского подвижного пояса, позволили выделить тренд омоложения перемагничивания (рис. 7) с северо-востока на юго-запад, что хорошо согласуется с

результатами изотопного датирования этих же комплексов. Полученный тренд перемагничивания, возможно, отражает направление коллизии в палеопротерозое.

2. В разных по составу породах, метаморфизованных одновременно в близких условиях, процессы перемагничивания проявляются по-разному. В эклогитах и габброноритах в центральной части Беломорского подвижного пояса сохраняется ранняя и фиксируется поздняя метакронная компонента намагниченности. В высокожелезистых метагаббро установлена только поздняя метакронная компонента намагниченности.

3. Степень сохранности вторичных ранних и поздних компонент намагниченности, возможно, связана не только с составом протолитов, но и с разными условиями преобразований пород, в том числе с их флюидонасыщенностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березин А.В., Скублов С.Г.* Эклогитоподобные апо-габбровые породы Керетского архипелага (о-ва Сидоров и Большая Илейка, Белое море): Особенности состава, условия и возраст метаморфизма // *Петрология*. 2014. Т. 22. № 3. С. 265–286.
- Бибикина Е.В., Слабунов А.И., Богданова С.В., Шельд Т.* Тектоно-термальная эволюция земной коры Карельской и Беломорской провинций Балтийского щита в раннем докембрии по данным уран-свинцового изотопного исследования сфенов // *Геохимия*. 1999а. № 8. С. 842–857.
- Бибикина Е.В., Слабунов А.И., Богданова С.В.* и др. Ранний магматизм Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит: латеральная зональность и изотопный возраст // *Петрология*. 1999б. Т. 7, № 2. С. 115–140.
- Володичев О.И., Слабунов А.И., Бибикина Е.В.* и др. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит // *Петрология*. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631.
- Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли: Мат-лы науч. конф. и путеводитель научных экскурсий. Петрозаводск, 2011. 398 с.
- Лубнина Н.В.* Перемагничивание пород Восточно-Европейского кратона: тектоническое районирование и геодинамические индикаторы // *Вестн. КРАУНЦ*. 2009. № 2. С. 325–353.
- Ранний докембрий Балтийского щита / Под ред. В.А. Глебовицкого. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
- Самсонов А.В., Третьяченко В.В., Носова А.А.* и др. Фундамент Архангельской алмазоносной провинции как юго-восточная часть Лапландско-Кольского коллизионного орогена // *Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли*. Петрозаводск, 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., Азимов П.Я., Глебовицкий В.А.* и др. Архейская и палеопротерозойская мигматизация пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // *Докл. РАН*. 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 // *Докл. РАН*. 2011. Т. 437, № 2. С. 1–5.
- Степанов В.С.* Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. Л.: Наука, 1981. 216 с.
- Buchan K.L., Mertanen S., Park R.G.* et al. Comparing the drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: the importance of key palaeomagnetic poles // *Tectonophys.* 2000. Vol. 319 (3). P. 167–198.
- Fedotova M.A., Khramov A.N., Pisakin B.N., Priyatkin A.A.* Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, Eastern Fennoscandian Shield // *Geophys. J. Int.* 1999. Vol. 137. P. 691–712.
- Kirschvink J.L.* The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data // *Geophys. J.R. Astr. Soc.* 1980. Vol. 62. P. 699–718.
- Lubnina N.V., Zakharov V.S., Novikova M.A., Vorontsova V.P.* Paleoproterozoic Remagnetization in the White Sea Mobile Belt, Karelia: Petro-paleomagnetic evidence and supercomputer modeling // *Moscow Univ. Geol. Bul.* 2015. Vol. 70 (2). P. 84–96.
- Pasenko A.M., Lubnina N.V.* The Karelian craton in the Paleoproterozoic: new paleomagnetic data // *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2014. Vol. 69 (4). P. 189–197.
- Stepanova A., Stepanov V.* Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield // *Precamb. Res.* 2010. Vol. 183 (3). P. 602–616.
- Zijderveld J.D.A.* Demagnetization of rocks: analysis of results // *Methods in Paleomagnetism*. Amsterdam a.o., 1967. P. 254–286.
- Zwing A.* Causes and Mechanism of Remagnetisation in Paleozoic rocks — a multidisciplinary approach: PhD thesis. München: Ludwig-Maximilian University, 2003. 159 p.

Поступила в редакцию
09.12.2015