

## ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ В ИЗУЧЕНИИ ОСНОВНОГО МАГМАТИЗМА БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

Степанова А.В., Степанов В.С., Слабунов А.И.

*Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск*

## ACHIEVEMENTS AND PROBLEMS IN THE STUDY OF MAFIC MAGMATISM IN THE BELOMORIAN PROVINCE OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD

Stepanova A.V., Stepanov V.S., Slabunov A.I.

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

The integrated study of distinctive Archaean and Palaeoproterozoic magmatism in the Belomorian province of the Fennoscandian Shield is essential for obtaining new fundamental evidence for the Earth's early history. Of great interest in this context are eclogites, which are unique for the Archaean, and oceanic (ophiolite etc.) mafic-ultramafic complexes. Eclogitized Palaeoproterozoic gabbroids, whose high-pressure alterations are still the subject of animated debate, are equally important. Palaeoproterozoic (Sumian and Jatulian) complexes of dyke and differentiated intrusive units are significant for the study of large igneous provinces in the eastern Fennoscandian Shield. Basic magmatism in the White Sea area is also of practical importance, because noble-metal mineralization has been revealed in the rocks of a gabbro-anorthosite and a lherzolite-gabbro-norite complex, and pyrite ores could be related to oceanic mafic rocks.

A distinctive feature of gabbroids from the Belomorian mobile belt is the abundance of drusitic (coronitic) structures. Hence the common terms "drusites". The basic achievements in the study of mafic intrusive rocks of the region are as follows. Isotopic dating has supported the existence of Archaean gabbroids, which seem to be widespread in the ophiolite-like complex, as well as leucocratic gabbro and metagabbro-anorthosites. Mesoarchaeo basic rocks from ophiolite-like complexes and Neoarchaeo gabbroids associated with the collapse of an Archaean collisional orogen deserve special attention.

In spite of successful research, the volume of Neoarchaeo gabbroids and their geodynamic nature in the Belomorian province remain underestimated and need further study.

At least three different-aged complexes: gabbro-norite, lherzolite-gabbro-norite and garnet gabbro are distinguished in Palaeoproterozoic drusites. The order of their formation ascertained was supported by isotopic dating. The formation of Palaeoproterozoic gabbroids was affected by mantle plumes.

The age and geochemical analogues of the lherzolite-gabbro-norite and coronitic gabbro complex in the Karelian and Kola provinces of the Fennoscandian Shield were identified. Gabbro-norite dykes, ca. 2.45 Ga layered intrusions high-Mg volcanics from Vetreny Poyas, which form part of an Early Palaeoproterozoic large igneous province, are similar to lherzolite-gabbro-norite and Jatulian plateau-basalts and dolerite dykes are similar to coronitic gabbro.

As we learn more about the composition, geochemical characteristics and isotopic age of the rocks of the complex, some problems arise. Three impulses of the intrusion of gabbro-norite dykes in the Belomorian province were distinguished, based on the examination of mafic dykes. Whether they are constituents of one differentiated complex or were formed in different periods of time is unknown. The time of formation of early Mg-tholeiites, understood earlier as part of a lherzolite-gabbro-norite complex and as a separate group, has not been reliably determined.

Another problem, which is still open to discussion, is the formation of eclogite parageneses in gabbro-norites and the estimation of the crystallization pressures and temperatures of magmatic phases.

Throughout the entire study of mafic intrusive complexes in the Belomorian province one of the most acute and debated problems is the estimation of the time of their formation. The study of the U/Pb system in zircons is the most rational way to obtain objective reproducible results by dating mafic intrusive rocks. The composition, morphology, geochemistry and mineral inclusions of zircons should be thoroughly analyzed to throw light on their genesis and to reveal the generations associated with a magmatic stage in the formation of mafic intrusion.

Основные интрузии Беломорья – объект привлекавший многих исследователей, начиная с Е.С. Федорова, в работе которого (Федоров, 1896) они были впервые описаны как «друзиты». Структурное своеобразие этих пород, общность минералогического-петрографических особенностей при широких вариациях составов пород продолжают

привлекать исследователей до настоящего времени.

Первые десятилетия изучения основных интрузивных пород Беломорья позволили выявить их специфические черты: 1) наличие коронарных (друзитовых, келифитовых, каймовых и пр.) структур, 2) вариации составов пород от перидо-

титов до анортозитов, 3) очень широкие вариации размеров тел – от первых метров до нескольких километров, 4) преобладание субогласных тектонизированных контактов и значительно меньшее количество секущих контактов.

Наиболее детальная классификация основных интрузивных пород Беломорья, отражающая представление о формировании беломорид в течение одного архейского тектоно-магматического цикла, разработана К.А. Шуркиным (Шуркин и др., 1960; Беломорский комплекс..., 1962 и ссылки там). Им выделены раннеорогенные и позднеорогенные друзиты. Первые из них К.А. Шуркин, также как Л.А. Косой (Косой, 1938), считает бескорневыми телами и видит в них черты сходства с офиолитами, а к позднеорогенным друзитам относит тела с четкими интрузивными контактами. В петрохимическом отношении обе выделяемые К.А.Шуркиным группы друзитов достаточно близки. В 60-е годы эти идеи получили широкое распространение и разделялись многими исследователями региона.

Изучение ключевых магматических объектов (узлов), проводившееся сотрудниками лаборатории петрологии и тектоники (ранее лаб. метаморфической петрологии, рук. М.М. Стенарь), позволило выполнить корреляцию интрузивов региона по вещественным параметрам и относительно геологическому возрасту, определить прототипы комплексов, установить их вещественные и геологические границы, интерполировать результаты определения абсолютного возраста. Петрологические исследования позволили оценить условия становления комплексов, состав мантийного источника и глубину генерации исходных магм, условия метаморфических преобразований.

В результате работ лаборатории были значительно пересмотрены существовавшие ранее представления о геологии и петрологии базитов-ультрабазитов Беломорской провинции и был выделен ряд архейских и палеопротерозойских магматических комплексов. Первое обобщение материалов было выполнено к 1975 году и опубликовано в научных отчетах, статьях и коллективной монографии «Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы докембрия Карелии» (1976). Более полный анализ материалов по основному магматизму Беломорской провинции был выполнен в монографиях «Основной магматизм докембрия Западного Беломорья» (Степанов, 1981) и «Амфиболиты и ранние базит-ультрабазиты докембрия Северной Карелии» (Степанов, Слабунов, 1989), «Геология и геодинамика архейских подвижных поясов...» (Слабунов, 2008) и ряде других публикаций (Степанова, 2004, Степанов, Степанова, 2006, Stepanova Stepanov, 2010).

Важным для понимания архейской и протерозойской истории формирования Беломорской провинции было сопоставление результатов изу-

чения интрузивных мафических образований с магматическими комплексами Карельского кратона. Проведенные исследования позволили сопоставить в возрастном и формационном отношении комплекс лерцолитов-габброноритов с расчлененными интрузиями Олангской группы и расчлененными интрузиями севера Финляндии (Степанов, 1976), а гранатовые (коронитовые) габбро с долеритами ятулийских даек Карельской провинции (Степанова, Степанов, 2005).

Следует отметить, что весьма существенный вклад в изучение мафических комплексов Беломорской провинции внесли также работы М.М. Ефимова (Ефимов, 1978) С.Б. Лобач-Жученко (Lobach-Zhuchenko et al., 1998), С.В. Богдановой (Bogdanova, Bibikova, 1993), Е.В. Бибиковой (Бибикова и др., 2004), В.В. Балаганского (Balagansky et al., 2001, Балаганский, 2002), Е.В. Шаркова (Шарков и др., 2004) и других исследователей.

К настоящему времени в Беломорской провинции уверенно выделяется ряд архейских интрузивных мафических комплексов, а именно: метабазиты и метаультрабазиты мезоархейского Центрально-Беломорского зеленокаменного комплекса, метагабброанортозиты Котозерского типа, неоархейские метагаббро. Среди палеопротерозойских мафических комплексов Беломорской провинции наиболее широко распространены образования, относимые к комплексу лерцолитов - габброноритов (~2.4 млрд. лет), коронитовые метагаббро возраста ~2.1 млрд. лет (рис. 1).

Архейские интрузивные образования Беломорской провинции наиболее сложны для изучения вследствие длительной тектоно-метаморфической истории их преобразований, выразившейся в практически полном исчезновении первичных магматических структур и минералов, нарушении Sm/Nd изотопной системы, формировании обширной популяции новообразованных метаморфогенных цирконов и обрастании цирконов ранней генерации поздней метаморфогенной оболочкой. Эти особенности существенно затрудняют интерпретацию геологических, геохимических и изотопных данных, требуют использования комплекса прецизионных и локальных методов анализа вещества.

Один из примеров успешного применения комплекса этих методов – мезоархейские метаультрабазиты и метабазиты Центрально-Беломорского зеленокаменного пояса (ЦБЗП). Этот пояс сложен преимущественно метамафит-ультрамафитами с редким прослоями и линзовидными телами орто- и парагнейсов, метанортозитов, колчеданов. ЦБЗП описанный ранее как Центрально-Беломорская мафическая зона (Ранний..., 2005). В его составе выделяется четыре структуры: Серяжская, Нигрозерская, Лоухско-Пиземская и Нижемско-Оленьостровская.

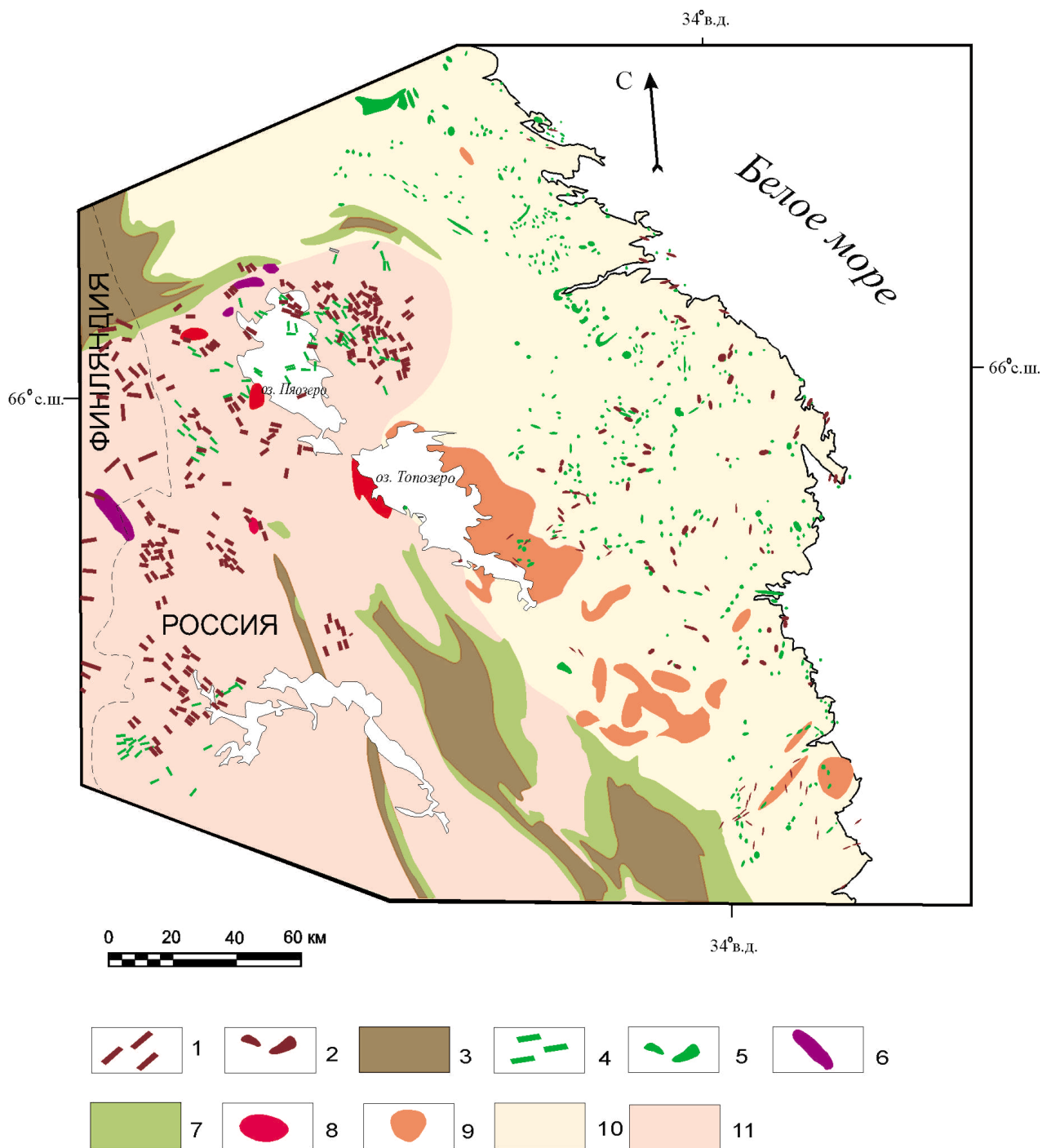


Рис. 1 Схема распространения палеопротерозойских мафических комплексов в центральной части Беломорской провинции и северо-восточной части Карельской провинции (Степанов, 1981; Слабунов и др., 2006; Stepanova, Stepanov, 2010).

1 – дайки долеритов возраста ~ 2.1-2.0 млрд. лет, Карельская провинция; 2 – дайки и малые интрузии комплекса коронитовых габбро Беломорской провинции; 3 – нерасчлененные вулканогенно-осадочные комплексы ятулия – людиковия; 4 – дайки габброноритов Карельской провинции; 5 – интрузии комплекса лерцолитов-габброноритов Беломорской провинции; 6 – дифференцированные базит-гипербазитовые интрузии ~ 2.45 млрд. лет; 7 – нерасчлененные вулканогенно-осадочные образования сумия-сариолия; 8 – граниты нуоруненского типа ~ 2.45 млрд лет; 9 – чарнокиты топозерского типа; 10 – архейские образования Беломорской провинции; 11 – архейские образования Карельской провинции.

Комплексное изучение базит-гипербазитовой ассоциации в наиболее сохранившейся и обнаженной Серякской структуре (Степанов, 1983) ЦБЗП (рис. 2) позволило установить, что ЦБЗП представляет собой реликтовую офиолитовую ассоциацию (Слабунов, 2008 и ссылки там).

Детальное картирование дало возможность определить соотношения базитов и гипербазитов, а минералого-петрографическое, в том числе микрозондовое изучение гипербазитов – установить последовательность метаморфических преобразований и состав реликтовых магматических минералов. Изучение геохимии гипербазитов и амфиболитов показало, что они не связаны друг с другом процессами кристаллизационного фракционирования, т.е. не являются реликтами дифференцированного интрузива.

Амфиболиты ЦБЗП по особенностям химического состава отвечают, главным образом, базальтам толеитовой серии, среди них отмечаются как высокожелезистые, так и высокомагнезиальные разновидности. По характеру распределения REE среди них выделяются три разновидности. Метабазальты первой группы, характеризующиеся недифференцированным распределением REE, близки по составу к базальтам срединно-океанических хребтов, но среди них отмечены также разновидности, обедненные HREE и высокозарядными элементами, что характерно для толеитов океанических плато. Аналогичные особенности имеют базиты ряда типичных офиолитовых комплексов. Метабазальты второй группы, характеризующиеся дифференцированным спектром распределения REE с низкими содержаниями HREE, сопоставимы с базальтами океанических островов. Природа амфиболитов третьей группы, характеризующихся обогащением LREE до конца не ясна, вероятно, они могут являться метасоматически измененными разновидностями.

Sm-Nd изотопные характеристики гипербазита рассматриваемой ассоциации ( $\varepsilon_{Nd}$  (2,85 млрд. лет) = +1,9) исключают коровую контаминацию и указывают на их формирование за счет деплетированной мантии, что также согласуется с представлениями о принадлежности их океанической коре (Слабунов, 2008).

Несмотря на существенные достижения в изучении мезоархейской базит-гипербазитовой ассоциации Беломорской провинции, нерешенными остаются многие проблемы. Широкие вариации геохимических характеристик амфиболитов в составе ЦБЗП не нашли окончательного объяснения к настоящему времени. Неясными остаются объем анортозитов в составе ЦБЗП и соотношения их с базитами и ультрабазитами. Возможно, что объем мезоархейских интрузивных комплексов существенно увели-

чивается, за счет габброанортозитов (Березин, 2011). Недостаточно изученными остаются условия и последовательность метаморфических преобразований ультрабазитов.

В пределах Беломорской провинции тектонически фрагментированные массивы метагаббро распространены довольно широко. Однако предполагаемый архейский возраст этих мафических интрузивов был обоснован слабо. В результате изучения габброидов в районе с. Гридино, в том числе на о. Супротивные было доказано, что среди метагаббро Беломорской провинции *неоархейские габброиды* развиты довольно широко (Степанова и др., 2008), а их возраст оценен в  $2711 \pm 25$  млн. лет (Слабунов и др., 2008).

Наиболее детально исследован фрагментированный массив неоархейских габброидов на южном острове Супротивный (рис. 3). Контакты фрагментов конформны гнейсовидности вмещающих пород, по их периферии развиваются гранатовые амфиболиты, образуя зоны мощностью до десяти метров.

Тела сложены мелко- и среднезернистыми метагаббро, варьирующими от мезо- до лейкократовых. Преобладают светлоокрашенные разновидности. В ряде случаев в телах установлены зоны мощностью до 5 м с магматической расслоенностью, обусловленной вариациями метагаббро от мезократовых (до 40% Pl) до лейкократовых (> 65% Pl). Мощность слоев варьирует от 1 до 3 см. Среди рассматриваемых габброидов преобладают разновидности с массивной текстурой и реликтами габбровой структуры. Породы не сохраняют первичных магматических минералов, в них развиты коронарные структуры, характерные для базитов Беломорской провинции.

Геохимические характеристики метагаббро о. Супротивные позволяют определить их как базиты нормальной щелочности толеитовой серии, обогащенные Fe. Существует и другой геохимический тип неоархейских габброидов в Беломорской провинции. Габброиды района губы Тупой (Балаганский и др., 1990) и небольшая часть габброидов района Гридино относятся к известково-щелочной серии. Они, по сравнению с другими разновидностями предположительно архейских габброидов, менее обогащены Ti и Fe. На спайдерграммах для всех неоархейских габброидов устанавливается слабая деплетированность высокозарядных элементов. Важно отметить, что по особенностям состава неоархейские габброиды отличаются от других мафических комплексов Беломорской провинции: друзиты комплекса лерцолитов-габброноритов и габброанортозитов имеют по сравнению с ними более высокую магнезиальность, низкие содержания высокозарядных элементов и резко дифференцированный характер

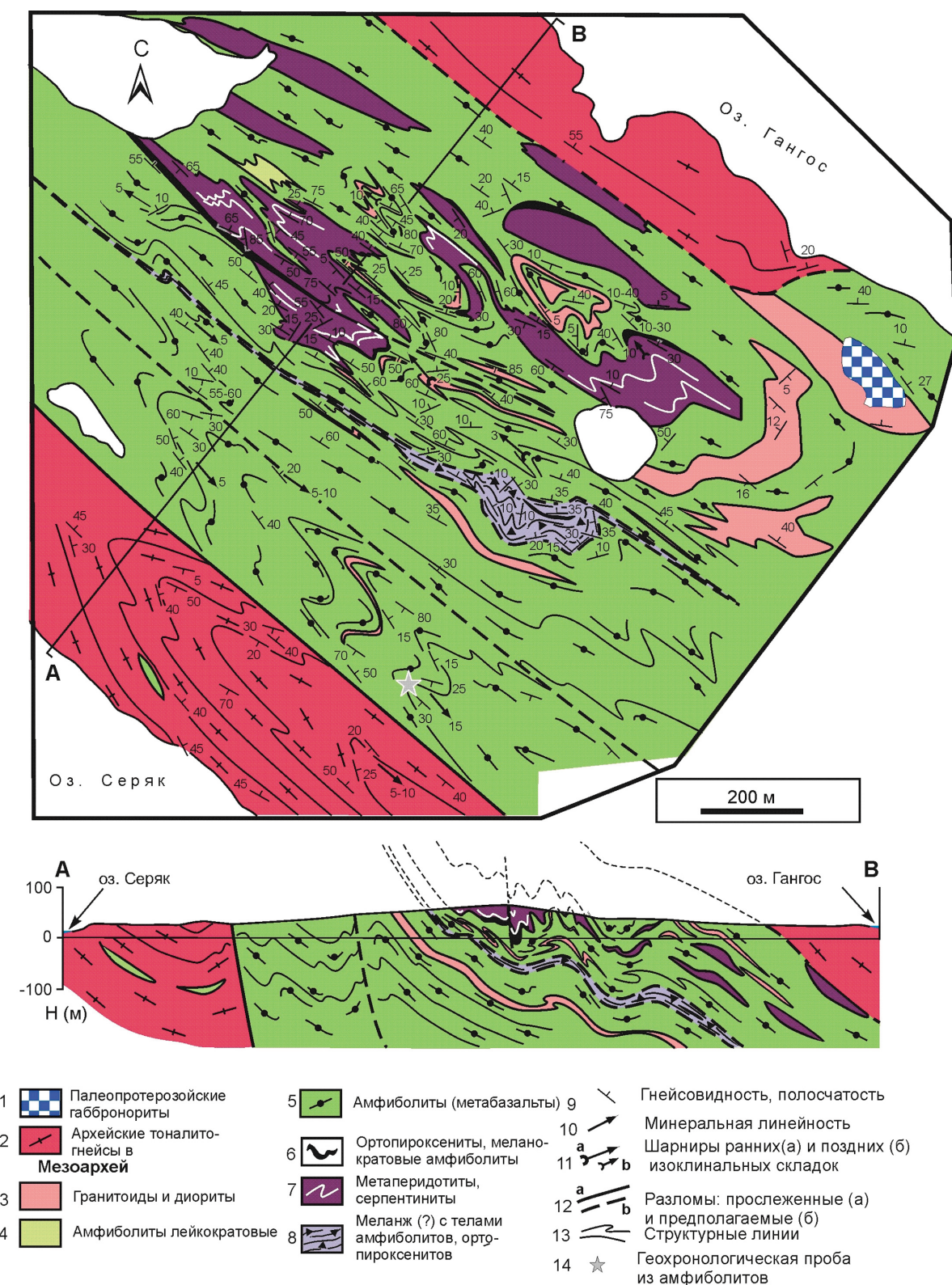


Рис. 2. Схема геологического строения фрагмента Серякской структуры Центрально-Беломорского зеленокаменного пояса на северо-восточном берегу оз. Серяк (Слабунов, 2008 и ссылки там).

1 – палеопротерозойские габбронориты; 2 – архейские тоналито-гнейсы с редкими телами амфиболитов. Мезоархей: 3 – гранитоиды и диориты; 4 – амфиболиты лейкократоровые; 5 – амфиболиты (метабазальты); 6 – ортопироксениты, меланократовые амфиболиты; 7 – метапериidotиты, серпентиниты; 8 – меланж (?) с телами амфиболитов, ортопироксенитов; 9 – гнейсовидность, полосчатость; 10 – минеральная линейность; 11 – шарниры ранних (а) и поздних (б) изоклиналильных складок; 12 – разломы прослеженные (а) и предполагаемые (б); 13 – структурные линии; 14 – геохронологическая проба из амфиболитов.

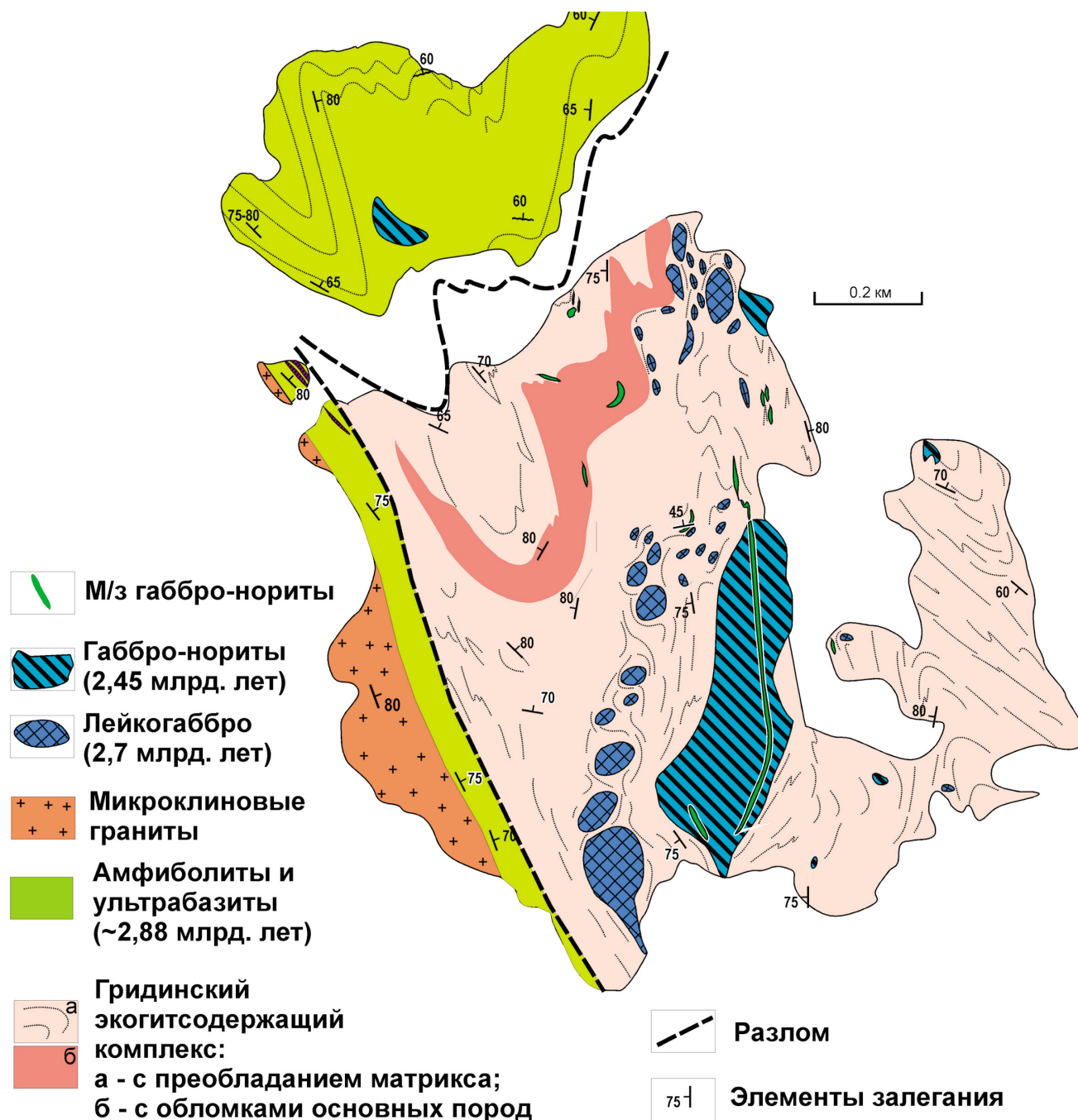


Рис. 3. Схема геологического строения о-вов Супротивные (Степанова и др., 2008 и ссылки там)

распределения REE. От пород комплекса коронитовых габбро они отличаются характером распределения высокочarged элементов, тогда как другие геохимические характеристики этих пород очень близки.

По ряду петрогеохимических особенностей неархейские габброиды района с. Гридино имеют аналоги среди фанерозойских базитов, формирующихся на этапе коллапса коллизионных орогенов, хотя и отличаются от последних большей дифференцированностью и обогащением крупноионными литофильными элементами, что, веро-

ятно, является следствием различной степени контаминации коровым веществом.

Несмотря на некоторые успехи, объем неархейских габброидов и их геодинамическая природа в Беломорской провинции остаются недооцененными. Последние находки архейских габбро-анортозитов, о которых упоминалось выше, подтверждают это.

Среди палеопротерозойских интрузивных образований Беломорской провинции наиболее древние представлены комплексом габбро-анортозитов (Степанов, 1981; Stepanov, Stepanova,

2001), формирующим ряд массивов (Пежостровский, Нижне-Поповский; Боярский). Несмотря на то, что время формирования габбро-анортозитов, определенное изотопными методами, близко к времени формирования комплекса лерцолитов-габброноритов и составляет 2.40 млрд. лет (Пежостровский массив; Alexejev et al., 2000) и 2.45 млрд. лет (Колвицкий массив; Mitrofanov et al., 1995), геологический возраст габброанортозитов определяется как более древний, чем возраст лерцолитов-габброноритов, так как они секутся интрузиями оливиновых меланогабброноритов.

Этот комплекс изучен к настоящему времени недостаточно. Время его формирования, состав и геохимические характеристики входящих в его состав интрузивов изучены не в полном объеме.

Комплекс лерцолитов-габброноритов, выделенный В.С. Степановым (Степанов, 1981), имеет наибольшее среди друзитов распространение в пределах Беломорской провинции (рис. 1). В настоящее время датированы Ковдозерский ( $2440 \pm 10$  млн. лет; Ефимов, Каулина, 1997), Шобозерский ( $2435 \pm 5$  млн. лет; Слабунов и др. 2000), Варацкий ( $2410 \pm 10$  млн. лет, Бибикова и др. 2004) массивы, а также эклотизированная дайка в р. не с. Гридино ( $2389 \pm 25$  млн. лет; Слабунов и др., 2011).

Контакты большей части интрузивов тектонически переработаны, их краевые части амфиболитизированы, однако в центральных частях тел сохраняются первично магматические структуры и минералы. Многие мелкие интрузии габброноритов являются тектонически разобленными фрагментами более крупных интрузивов или даек, форму и размеры которых в большинстве случаев невозможно реконструировать.

Как показали результаты исследований последних лет, дайки являются существенным компонентом комплекса. Рои мафических даек преимущественно северо-западного простирания закартированы в хорошо обнаженных участках на побережье Белого моря, из которых район с. Гридино (рис. 4) является в настоящее время наиболее изученным.

Геохимические характеристики габброноритов, такие как высокая магнезиальность пород (содержание MgO в недифференцированных разновидностях до 16%), высокие содержания Ni (до 1200 ppm) и Cr (до 1800 ppm), дифференцированный характер распределения P3Э ( $(La/Sm)_n = 2.25-2.80$ ,  $(Gd/Yb)_n = 1.24-2.57$ ), деплетированность высокочarged элементов ( $Nb/Nb^* = 0.30-0.51$ ,  $Zr/Zr^* = 0.69-0.97$ ), обогащение LIL-элементами, отрицательные значения  $\epsilon Nd_{2.45}$  (от +0.2 до -1.8, Lobach-Zhuchenko et al., 1998) предполагают, что исходные расплавы были получены в результате высоких степеней плавления гранатсодержащего источника, а их дальнейшая эволюция включала процессы коровой контаминации.

Возрастными и геохимическими аналогами образований комплекса лерцолитов-габброноритов являются широко распространенные в Карельской и Кольской провинциях Фенноскандинавского щита дайки габброноритов, расслоенные интрузии возраста  $\sim 2.45$  млрд. лет и высокомагнезиальные вулканы Ветреного пояса – компоненты раннепалеопротерозойской крупной магматической провинции (Stepanova, Stepanov, 2010), формирование которой было, вероятно, обусловлено подъемом мантийного плюма и процессами рифтогенеза в восточной части Фенноскандинавского щита (Слабунов и др., 2006; Шарков и др., 2004; Kulikov et al., 2010).

Расширение знаний о составе, геохимических характеристиках и изотопном возрасте пород комплекса, выявило ряд нерешенных проблем. На основании изучения мафических даек установлено существование трех импульсов внедрения габброноритовых даек в Беломорской провинции. Не известно, являются ли они компонентами одного дифференцированного комплекса, или были сформированы в разное время. Достоверно неизвестно также время формирования ранних Mg-толеитов, рассматривавшихся ранее в составе комплекса лерцолитов-габброноритов, выделенных в отдельную группу (Степанов, Степанова, 2006). Весьма дискуссионной остается проблема формирования эклотитовых парагенезисов в габброноритах и взаимосвязанная с ней проблема определения РТ-параметров кристаллизации магматических фаз.

Наиболее молодые докембрийские мафические интрузивные образования Беломорской провинции представлены комплексом коронитовых габбро (гранатовые габбро по В.С. Степанову, 1981) и относятся к Fe-толеитовой серии. Магматическая стадия формирования интрузий этого комплекса оценивается в  $2115 \pm 25$  млн. лет (Степанова и др., 2003), что хорошо согласуется с геологическими данными, согласно которым они имеют секущие контакты с массивами лерцолитов-габброноритов (Степанов, 1981).

Данный комплекс объединяет многочисленные метаморфизованные дайки и малые интрузивные тела (рис. 1). Характерной их особенностью является повсеместное развитие коронарных структур, представляющих собой реакционные каймы на границе зерен плагиоклаза и клинопироксена. Внешняя часть кайм сложена ксеноморфным гранатом, внутренняя – тонкозернистым кварц-роговообманковым агрегатом гранобластовой структуры. В породах отмечаются реликты габбровой и офитовой структур.

Коронитовые габбро отличаются довольно низким содержанием MgO ( $<7.5\%$ ) и повышенным содержанием суммарного железа ( $>12\%$ ) и  $TiO_2$  ( $>1\%$ ), что позволяет классифицировать их как высокожелезистые толеиты. Наиболее близкими их аналогами являются континентальные

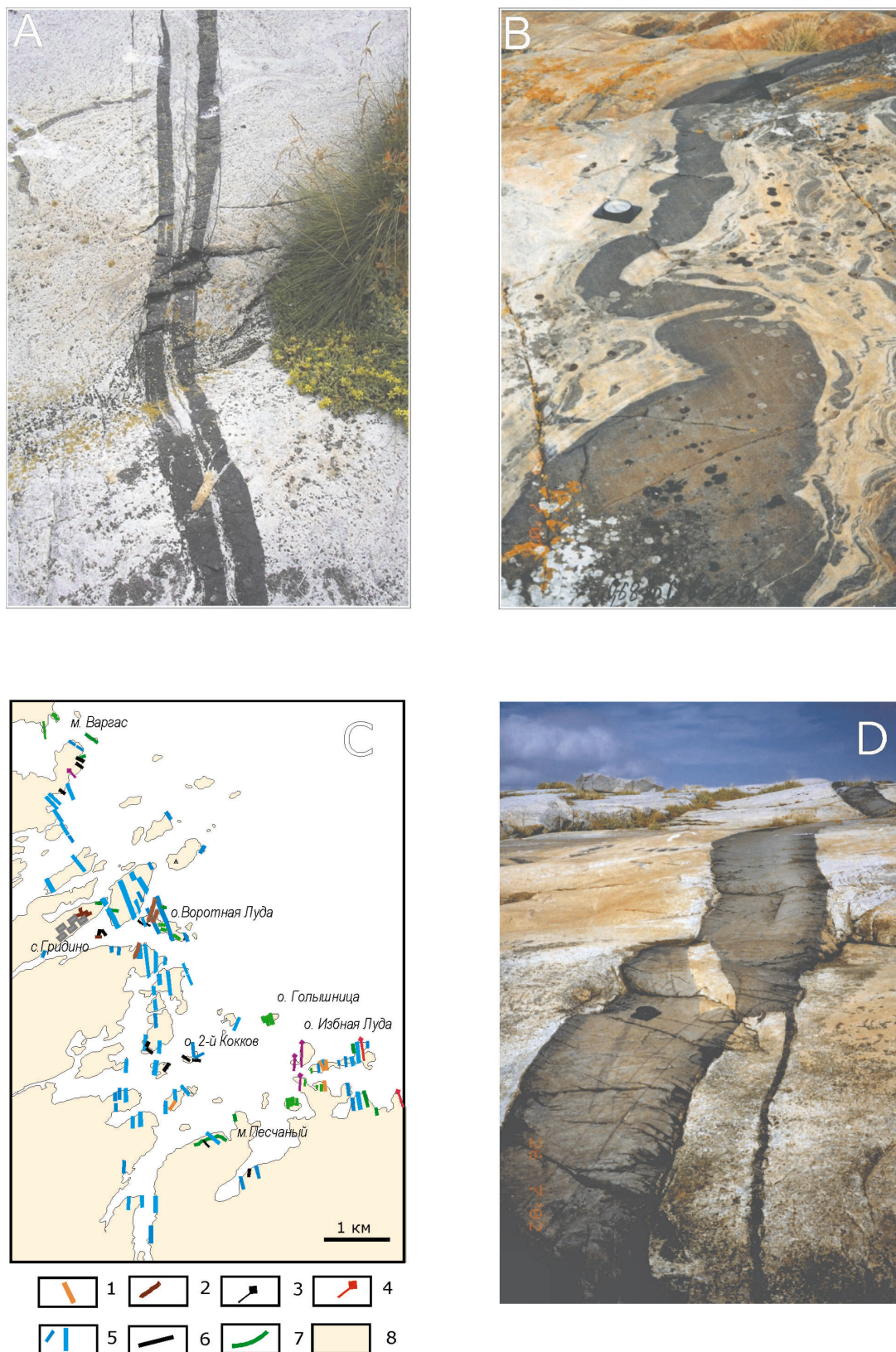


Рис. 4. Дайки габброидов в районе с. Гридино. Схема

Морфология Mg-толеитовых даек: А, D – о-в Гольшница; В – мыс Варгас (Фото Степанова В.С); С – схема Гридинского дайкового поля (Степанов, Степанова, 2006): 1 – дайки коронитовых габбро о-ва Избная Луда; 2 – дайки коронитовых габбро о-ва Воротная Луда; 3 – магнезиальные метадiorиты; 4 – железистые метадiorиты; 5 – породы комплекса лерцолитов – габброноритов; 6 – ранние палеопротерозойские метагаббро; 7 – субшелочные метагаббро; 8 – архейские супракрустальные образования.

платобазальты (низко-Ti-Zr разновидности). Характер распределения PЗЭ ( $(La/Sm)_n = 1.34-1.83$ ,  $(Gd/Yb)_n = 1.22-1.84$ ) свидетельствует о том, что родоначальные магмы формировались путем плавления мантийного источника, не содержащего гранат. Дальнейшая эволюция магм предполагает фракционную кристаллизацию при преимущественном оливиновом контроле с незначительным участием клинопироксена. После солидификации этих пород произошли метаморфические изменения (формирование коронарных структур) при  $P = 5-6$  кбар и  $T = 650^\circ\text{C}$  (Степанова, 2004).

Исходя из близкого возраста и сходства геохимических характеристик, коронитовые габбро являются интрузивными аналогами ятулийских платобазальтов и даек долеритов Карельского кратона и компонентом питающей системы этой магматической провинции.

В последние годы среди коронитовых габбро установлены геохимические разновидности, определенные нами как низко-Ti толеиты MORB-типа, которые впервые были установлены в Гридинском дайковом поле (Степанова, Степанов, 2005), но, вероятно, распространены значительно шире и имеют геохимические аналоги среди даек долеритов Карельского кратона. Существенный интерес представляют не только специфические геохимические характеристики этих пород, но и морфология тел, высокобарные (в том числе эклогитовые) минеральные парагенезисы в сочетании с отсутствием реликтовых магматических структур.

Высокотитанистые разновидности коронитовых габбро характеризуются специфичной геохимией и являются геохимическими аналогами даек высоко-Ti оливиновых долеритов Карельского кратона. Время их формирования не определено, но, возможно, они являются компонентом людиновской крупной магматической провинции возраста  $\sim 2.0$  млрд. лет, образования которой в Беломорской провинции к настоящему времени не установлены.

На протяжении всей истории изучения мафических интрузивных комплексов Беломорской провинции определение времени их формирования остается одной из наиболее острых и широко обсуждаемых проблем.

Для U-Pb датирования основных пород обычно используют акцессорные минералы цирконы и бадделеиты (Баянова, 2004). Кроме того, возможно применение Sm-Nd изохронного метода по первично-магматическим минералам. Однако при метаморфических изменениях бадделеит становится неустойчивым, а Sm-Nd система переуравновешивается. Эти процессы особенно интенсивно проявлены в полиметаморфических комплексах (Каулина, 2010), к числу которых относится и беломорский. В этом случае наиболее рациональным путем получения объективных, воспроизводимых результатов при датировании основных

интрузивных пород является изучение U/Pb системы в цирконах.

Однако и этот путь решения задачи имеет значительные трудности по ряду объективных причин. Одна из них состоит в том, что габброиды, формирующиеся на континентах, испытывают коровую контаминацию и, как следствие, содержат ксеногенные цирконы, захваченные из вмещающих пород. Задача усложняется, когда габброиды претерпевают наложенные метаморфические преобразования, в ходе которых формируются новые генерации циркона. В результате при датировании на ионных зондах единичных зерен из популяции цирконов, выделенных из таких габброидов, часто наблюдается широчайший спектр значений возрастов. От корректной интерпретации этих данных зависит понимание особенностей становления как конкретных массивов, так и континентальной земной коры региона в целом. Поэтому требуется специальный анализ природы каждой генерации цирконов популяции. Для этого необходимо всестороннее рассмотрение состава, морфологии, геохимии цирконов, а также содержащихся в них минеральных включений.

На примере цирконов из эклогитизированных габброноритов комплекса лерцолитов – габброноритов района с. Гридино можно продемонстрировать алгоритм работы при оценке временной последовательности событий формирования и преобразовании основных пород (Слабунов и др., 2011). В такой работе датирование отдельных зерен на ионном зонде сопровождается анализом состава минеральных включений и геохимии цирконов. Это позволяет существенно ограничить число моделей формирования цирконов и, соответственно, корректно оценить датируемое событие в истории образования породы.

Изотопно-геохронологические исследования цирконов из двух проб (Володичев и др., 2011; Слабунов и др., 2011), отобранных из центральной и периферийной частей одного тела габброноритов, позволили выделить в их составе три возрастные группы этого минерала (рис. 5): в группу I входят архейские (2.6–2.8 млрд. лет) разновидности, группу II составляют цирконы с возрастом  $\sim 2400$  млн. лет, а третью составляют минералы с возрастом 1911 млн. лет. Цирконы групп I и II присутствуют в обеих пробах, а цирконы III – только в ретроградно преобразованных эклогитах второй пробы.

Цирконы I группы (Рис. 5а,б), имеющие размер 60–200 мкм, представлены двумя морфологическими разновидностями: короткопризматическими с четкой осцилляционной зональностью и призматическими с простой зональностью.  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраст первой разновидности цирконов – 2720–2840 млн. лет, а второй – 2700–2720 млн. лет.

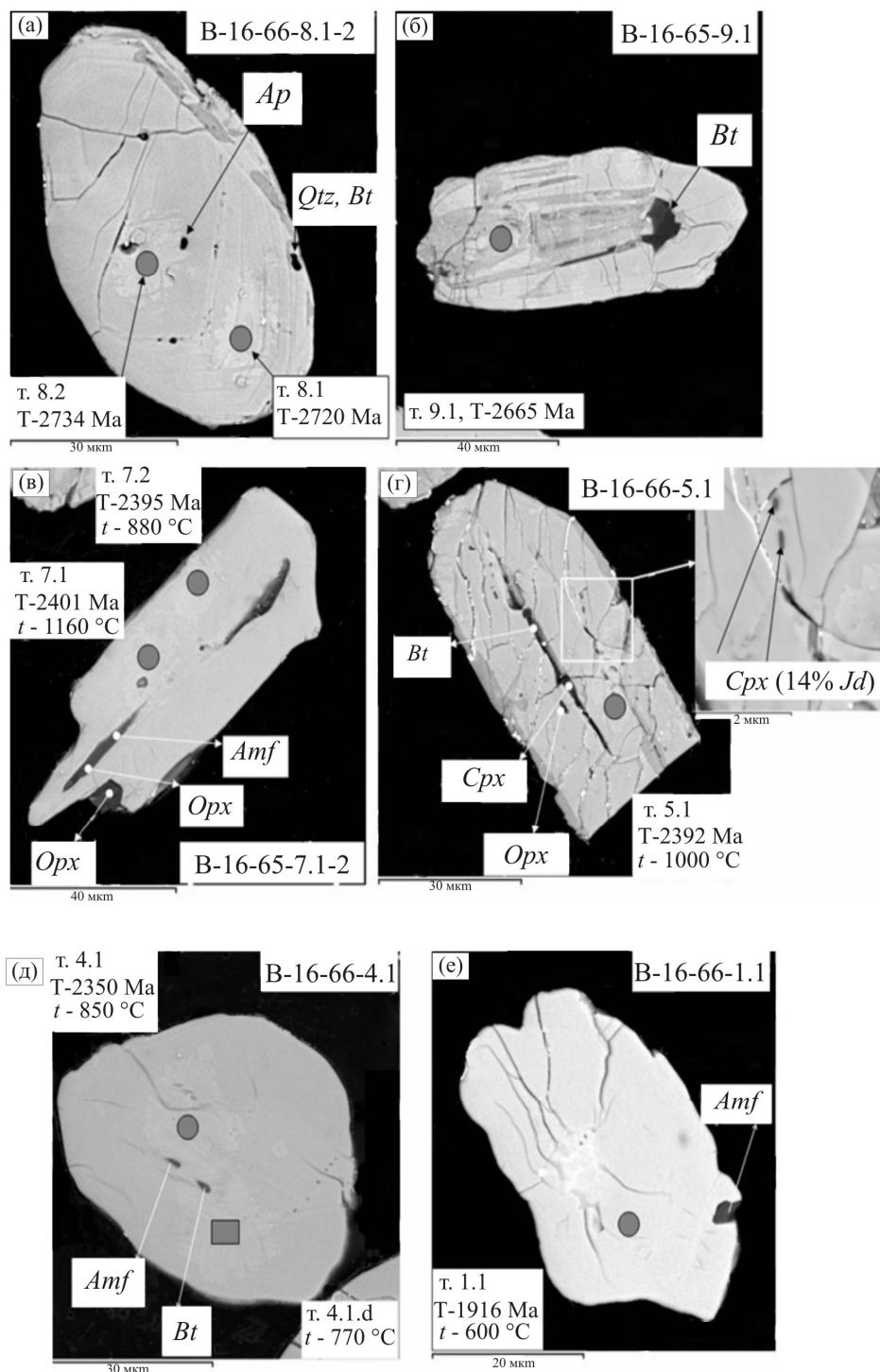


Рис. 5. Снимки кристаллов цирконов в отраженных электронах (выполнены на микрозонде в ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск) с обозначениями минералов-включений, мест определения изотопных возрастов (выполнены на ионном масс-спектрометре SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург с указанием значений  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраста (T) в млн. лет, содержаний редких элементов и температур (t) образования цирконов:

а-б – архейские ксеногенные цирконы короткопризматические (а) и призматические (б); в-г – палеопротерозойские магматические («габброидные») цирконы, образовавшиеся на поздних стадиях кристаллизации габброноритов –  $2389 \pm 25$  млн. лет (возможно, что на самых поздних стадиях начался процесс эклогитизации); д-е – метаморфические цирконы: д – палеопротерозойский (2350 млн. лет), вероятно, стадии эклогитизации (?); е – циркон поздней ( $1911 \pm 9.5$  млн. лет) стадии преобразования габбронорита в условиях амфиболитовой фации (Володичев и др., 2011 с изменениями).

Цирконы II группы представлены тремя морфологическими типами: А) крупными ( $> 100$  мкм) призматическими, незональными зернами (рис. 5в, г), сопоставимыми с «габброидными» цирконами; Б) зернами округлой формы, размером до 90 мкм, с нечеткой зональностью (рис. 5д), сходными с «гранулитовыми» цирконами; В) крупными ( $> 150$  мкм) фрагментами призматических зерен. U-Pb возраст цирконов IIА по верхнему пересечению дискордии оценивается в  $2389 \pm 25$  млн. лет,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраст округлого циркона IIБ – 2350 млн. лет, а U-Pb возраст циркон IIВ –  $2469 \pm 30$  млн. лет.

Цирконы III группы (рис. 5е) представлены крупными (60–100 мкм) округлыми или неправильной формы кристаллами с нечеткой зональностью или без нее. Их U-Pb возраст  $1911 \pm 9.5$  млн. лет.

В цирконах всех групп с помощью INCA Energy 350 на базе сканирующего электронного микроскопа VEGA LSH (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск) были изучены минеральные включения. В цирконах группы I включения представлены *Q*, *Ap*, *Bt*, и *Chl*. В «габброидных» цирконах группы IIА включения сложены *Orp*, *Crp*, *Hbl* и *Bt*, причем крупные включения сосредоточены в осевой части зерен (рис. 5в, г), а мелкие рассредоточены по всему объему. Весьма существенно, что в краевой зоне одного из зерен циркона группы IIА установлены мелкие включения *Crp* с содержанием до 14% *Jd* (рис. 5г). В округлом зерне циркона группы IIБ отмечены небольшие включения *Hbl* и *Bt* (рис. 5д). В отличие от этого в цирконах группы III включения, как правило, отсутствуют, но отмечены лишь единичные обособления *Hbl* (рис. 5е) и *Bt*. При этом цирконы различных возрастных групп и морфологических разновидностей обладают и геохимическим своеобразием, которое проявляется в вариациях содержания U, Th обычного и радиогенного Pb, изотопных отношений  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}^{235}$ , а также в содержании элементов – примесей. Кроме того, различные цирконы отличаются и по температуре образования, которая оценивается на основании содержания Ti в цирконе (Володичев и др., 2011).

Еще один пример использования U/Pb изотопного датирования цирконов из основных пород для проверки представлений о возрасте и океанической природе базит-гипербазитового комплекса ЦБЗП в р-не оз. Серяк. Изучение цирконов, выделенных из амфиболитов (метагабброидов) данной ассоциации ЦБМЗ, показало (Слабунов и др., 2009), что в них присутствует две метаморфогенные генерации и не обнаружены захваченные зерна. Возраст метаморфических цирконов ранней генерации по верхнему пересечению оценивается в  $2836 \pm 49$  млн. лет, а поздней – 1835 млн. лет. Таким образом, данные амфиболиты образовались по ювенильным базитам с возрастом не моложе 2840 млн. лет.

Всестороннее изучение весьма своеобразного архейского и палеопротерозойского основного магматизма Беломорской провинции Фенноскан-

динавского щита имеет большое значение для получения новых фундаментальных знаний о ранней истории Земли. Наибольший интерес при этом представляют уникальные для архея эколгиты и океанические (в том числе, офиолитовые) мафит-ультрамафитовые комплексы. Не менее важны и эколгитизированные палеопротерозойские габброиды, высокобарные преобразования которых пока являются предметом широкой дискуссии. Палеопротерозойские (сумийские и ятулийские) комплексы дайковых и дифференцированных интрузивов актуальны для исследования крупных магматических провинций восточной части Фенноскандинавского щита. Основной магматизм Беломорья имеет также и практическое значение, т.к. установлена благороднометальная минерализация в породах комплекса габбро-анортозитов (рудопоявление Травяная губа, минерализация о-ва Илейки) и комплекса лерцолитов-габброноритов (рудопоявление Ковдозерского массива, массива Юдомнаволоок-Кузема), а с океаническими мафитами могут быть связаны колчеданные руды (зона оз. Серяк – мыс Картеш Белого моря).

Работа является вкладом в реализацию программы № 6 ОНЗ РАН.

### Литература

Балаганский В.В. Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое // Автореф. докт. ...геол.-мин. наук. СПб, 2002. 32 с.

Балаганский В.В., Библикова Е.В., Богданова С.В., Кирилова Т.И., Марков В.А., Сумин Л.В. U-Pb геохронология беломорид района Тупой губы оз. Ковдозеро (Северная Карелия) // Изв. АН СССР. Сер.геол. 1990. № 6. С. 40–51.

Баянова Т.Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб: Наука, 2004. 174 с.

Березин А.В. Геология и петрология рудоносных базитовых интрузий поджумской структурной зоны (Карелия, Западное Беломорье) // Автореф. канд. ...геол.-мин. наук. СПб, 2011. 24 с.

Володичев О.И., Слабунов А.И., Сибелев О.С., Скублов С.Г., Кузенко Т.И. Геохронология, минеральные включения и геохимия цирконов из эколгитизированных габброноритов Беломорской провинции (с. Гридино) // Геохимия. 2011 (в печати).

Библикова Е.В., Богданова С.В., Глебовицкий В.А., Клайсон С., Шельд Т. Этапы эволюции Беломорского подвижного пояса по данным U-Pb цирконового геохронологии (ионный микрозонд NORDSIM) // Петрология. 2004. № 3. С. 227–244.

Ефимов М.М. К геологии «друзитов» Северо-Западного Беломорья // Базит-гипербазитовый магматизм Кольского полуострова. Апатиты, 1978. С. 58–70.

Ефимов А.А., Каулина Т.В. Геологические особенности и U-Pb датирование (первые данные) юго-восточной части Ковдозерского базит-гипербазитового массива (блок Пухта) // Беломорский подвижный пояс (геология, геодинамика, геохронология). Тезисы докладов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. С. 31.

Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы докембрия Карелии. 1976. Л.: Наука, 154 с.

Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты, 2010. 114 с.

Косой Л.А. Геолого-петрографический очерк Керетского района Северной Карелии // Уч. зап. ЛГУ. Сер. геол.-почв. наук. 1938. Вып. 6. № 26. С. 98–116.

Ранний докембрий Балтийского щита. Под ред. Глебовицкого В.А. СПб.: Наука, 2005. 711 с.

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

Слабунов А.И., Бибилова Е.В., Степанов В.С., Володичев О.И., Балаганский В.В., Степанова А.В., Сибелев О.С. Беломорский подвижный пояс // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программам EUROPROBE. Под ред. Морозова А.Ф., Павленковой Н.И. М: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. С. 143–151.

Слабунов А.И., Володичев О.И., Скублов С.Г., Березин А.В. Главные стадии формирования палеопротерозойских эклогитизированных габброноритов по результатам U-Pb (SHRIMP) датирования цирконов и изучения их генезиса // ДАН. 2011. Том 437. №2. С.238–242.

Слабунов А.И., Ларионов А.Н., Бибилова Е.В., Степанов В.С., Кирнозова Т.И. Геология и геохронология Шобозерского массива комплекса лерцолитов-габброноритов Беломорского подвижного пояса // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 3. Петрозаводск. 2001. С.3–14.

Слабунов А.И., Степанова А.В., Бибилова Е.В., Бабарина И.И., Матуков Д.И. Неоархейские габброиды Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: геология, состав, геохронология // ДАН. 2008. Том 422. № 6. С. 793–797.

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

Степанов В.С. Ультрабазиты и амфиболиты оз.Сержак (к проблеме генезиса беломорских амфиболитов) // Петрология глубокометаморфизованных комплексов Карелии. Петрозаводск, 1983. С. 27–38.

Степанов В.С., Слабунов А.И. Амфиболиты и ранние базит-ультрабазиты докембрия Северной Карелии. Л.: Наука, 1989. 175 с.

Степанов В.С., Степанова А.В. Гридинское дайковое поле: геология, геохимия, петрология // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минералогия. Материалы научной конференции и путеводитель экскурсии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С.285–288.

Степанов В.С., Степанова А.В. Ранние палеопротерозойские метагаббро района с. Гридино (Беломорский подвижный пояс) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 55–71.

Степанова А.В. Петрология высокожелезистых толеитовых дайковых комплексов раннего протерозоя Северной Карелии // Автореф. канд. ...геол.-мин. наук. СПб., 2004. 24 с.

Степанова А.В., Ларионов А.Н., Бибилова Е.В., Степанов В.С., Слабунов А.И. Раннепротерозойский (2.1 млрд. лет) Fe-толеитовый магматизм беломорской провинции Балтийского щита: геохимия, геохронология // ДАН. 2003. Том 390, № 4. С. 528–532.

Степанова А.В., Степанов В.С. Коронитовые габбро Беломорского подвижного пояса // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.8. Петрозаводск, 2005. С. 29–39.

Степанова А.В., Слабунов А.И., Бабарина И.И. Неоархейские лейкогаббро о. Супротивные (Белое море): геология и особенности состава // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 11. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2008. С. 18–36.

Шарков Е.В., Красивская И.С., Чистяков А.В. Диспергированный мафит-ультрамафитовый интрузивный магматизм подвижных зон раннего палеопротерозоя Балтийского щита на примере друзитового (коронитового) комплекса Беломорья // Петрология. 2004. Том 12, №6. С. 632–655.

Шуркин К.А., Горлов Н.В., Салье М.Е., Дук В.Л., Никитин Ю.В. Беломорский комплекс Северной Карелии и Юго-Запада Кольского полуострова (геология и перматитовосность). М.-Л., 1962. 306 с.

Шуркин К.А., Дук В.Л., Митрофанов Ф.П. Материалы к геологии и петрографии габбро-лабрадоритов архея Северной Карелии // Геология и абсолютный возраст докембрия Балтийского щита и Восточной Сибири. М.- Л., 1960. С. 120–149.

Федоров Е.С. О новой группе изверженных пород // Изв. Московского сельхоз. ин-та. Кн.1. 1896. С. 168–187.

Alexeev N., Zinger T., Belyatsky B., Balagansky V.V. Age of crystallization and metamorphism of the Pezhostrov gabbro-anorthosites, northern Karelia, Russia // 5-th SVEKALAPKO Workshop. Abstracts. Lammi. Finland. 2000. P. 3.

Balagansky V.V., Timmerman M.J., Kozlova N.E., Kisilitsyn R.V. A 2.44 Ga syn-tectonic mafic dyke swarm in the Kolvitsa Belt, Kola Peninsula, Russia: implications for the early Palaeoproterozoic tectonics in the north-eastern Fennoscandian Shield. Precambrian Research. 2001. Vol. 105. P. 269–287.

Bogdanova S.V., Bibikova E.V. The “Saamian” of the Belomorian Mobile Belt: new geochronological constraints // Precambrian Research. 1993. Vol. 64. P. 131–152.

Lobach-Zhuchenko S.B., Arestova N.A., Chekulaev V.P., Levsky L.K., Bogomolov E.S., Krylov I.N. Geochemistry and petrology of 2.40–2.45 Ga magmatic rocks in the north-western Belomorian Belt, Fennoscandian Shield, Russia // Precambrian Research. 1998. Vol. 92. P. 223–250;

Mitrofanov F.P., Balagansky V.V., Balashov Yu.A., Dokuchaeva V.S., Gannibal L.F., Nerovich L.I., Radchenko M.K., Ryungenen G.I. U-Pb age of gabbro-anorthosite massifs in the Lapland Granulite Belt // Nor. Geol. Unders. Spec. Publ. 7. 1995. P. 179–183

Kulikov V.S., Bychkova Ya.V., Kulikova V.V., Ernst R. The Vetryny Poyas (Windy Belt) subprovince of southeastern Fennoscandia: An essential component of the ca. 2.5–2.4 Ga Sumian large igneous provinces // Precambrian Research. 2010. Vol.183. №3. P. 589–601.

Stepanov V.S., Stepanova A.V. Precambrian anorthosites in the Belomorian Mobile Belt, Eastern Fennoscandian Shield // Ilmenite deposits and their geological environment // NGU. Report no. 042. 2001. P. 137–138.

Stepanova A., Stepanov V. Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield // Precambrian Research. 2010. Vol.183. №3. P. 602–616.