

ВСЕГЕИ

ISSN 0869-7892

**РЕГИОНАЛЬНАЯ
ГЕОЛОГИЯ
И МЕТАЛЛОГЕНИЯ**

**2013
55**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

ПЕТРОЛОГИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД ФОРМАЦИИ РАПАКИВИ (о. ГОГЛАНД)

Геологические, геохимические и изотопно-геохимические исследования вулканитов на о. Гогланд подтвердили, что порфировые риодакиты (1638–1640 млн лет), входящие в состав хогландинской свиты палеопротерозоя, образовались из магмы, родоначальной для гранитов рапакиви Выборгского массива, а плагиопорфировые базальты кристаллизовались из основных расплавов, родственных габбро-анортозитам и диабазам. Вулканические породы формировали покровы с шаровыми структурами, характерными для подводных изливаний лав. Аномальные соотношения щелочей в кислых и основных вулканитах (повышенные содержания K_2O и низкие Na_2O) связаны с серицитизацией девитрифицированной основной массы и лейст плагиоклаза. Эти процессы определялись взаимодействием вулканитов с морской водой, обогащенной калием, во время подводного излияния.

Ключевые слова: формация рапакиви, Выборгский массив, Гогланд, петрология, минералогия, геохимия, изотопная геохимия, редкие элементы, риодакиты, базальты, подушечные лавы, кварциты, конгломераты, кремнистые сланцы, гранитогнейсы, граниты рапакиви, коры выветривания, метасоматоз, серицитизация.

Geological, geochemical and isotope-geochemical researches of volcanicites from the Island Gogland were conducted. It is established that subhorizontal strata of porphyritic rhyodacites and porphyritic basalts form covers with typical pillow structures, which characteristic for underwater sea outpourings. Geochemical and isotope-geochemical data confirm that porphyritic rhyodacites (1640 Ma) were formed contemporaneously with the rapakivi granites of Vyborg massif, and porphyritic basalts are similar to gabbro-anorthosites. Abnormal proportions of alkalis in the porphyritic rhyodacites and porphyritic basalts are interpreted here as a consequence of the interaction between magmas and hot K-rich sea water. It is supposed, that potassium-saturated hydroterms were formed due to release of fluids derived from high potassium magmas of the basalts and rapakivi granite into sea waters.

Keywords: rapakivi formation, Viborg massif, Hogland, petrology, mineralogy, geochemistry, isotope geochemistry, trace element's, rhyodacites, basalts, pillow lavas, quartzites, conglomerates, chertes, granite gneiss, rapakivi granites, waste mantle, metasomatism, sericitization.

Введение. Одним из актуальных вопросов петрологии формации гранитов рапакиви является определение природы и химического состава первичных магм, из которых кристаллизовались интрузии гранитов. Возможный путь решения этой задачи – изучение химического состава эфузивных аналогов гранитов рапакиви. На о. Гогланд, расположенным в Финском заливе у южной границы Выборгского массива рапакиви, обнажаются мощные толщи кислых вулканических пород, согласно Петрографическому кодексу [4] относящиеся к порфировым риодакитам. Эти породы, именуемые предыдущими исследователями кварц-полевошпатовыми порфирами [13, 17, 20], образовались из магмы, родоначальной для гранитов рапакиви. Однако результаты изучения химического состава порфировых риодакитов [3, 8–10, 14] показали более высокие содержания в них щелочей по сравнению с гранитами рапакиви. Так, концентрации K_2O в порфировых риодакитах достигают 9,6%, а минимальные содержания Na_2O составляют 0,15%. Отношение K_2O/Na_2O (мас.%) от 10 до 46, тогда как в классических гранитах рапакиви Выборгского массива это отношение находится в более узких пределах – от 1,8 до 2,5 [1, 8, 16]. Было также установлено, что и в плагиопорфировых базальтах (плагиоклазовых порфиритах), которые рассматриваются как вулканические аналоги габбро-анортозитов Выборгского комплекса рапакиви, содержания K_2O достигают 5%, а Na_2O

понижены до 0,15%. Отношение K_2O/Na_2O изменяется от 3 до 20, тогда как в габбро-анортозитах Выборгского массива оно составляет 0,1–0,5 [1, 3, 9, 16].

Природа процессов, приводящих к появлению аномальных содержаний калия и натрия в кислых и основных вулканитах комплекса рапакиви, практически не обсуждалась в современной петрологической литературе. Тогда как исследование геологических и физико-химических условий формирования таких пород представляется весьма важным для понимания петрологии формации гранитов рапакиви.

Геологическое строение о. Гогланд. По геологическим и геофизическим данным севернее и восточнее острова проходит южная граница Выборгского массива рапакиви (рис. 1). По результатам работ [3, 6, 7, 9, 10, 13, 17, 20] установлено, что в геологическом строении острова принимают участие породы кристаллического основания – сложнодислоцированные гранитогнейсы и амфиболиты палеопротерозоя, которые прорваны интрузиями синкинематических перидотитов, габбро-норитов, кварцевых диоритов, посткинематических гранитоидов и пегматитов. На породах фундамента субгоризонтально залегают образования хогландинской свиты, в составе которой выделяются снизу вверх три пачки пород: кварцевые конгломераты и кварциты 0–30 м; плагиопорфировые базальты 0–40 м; порфировые риодакиты до 110 м.

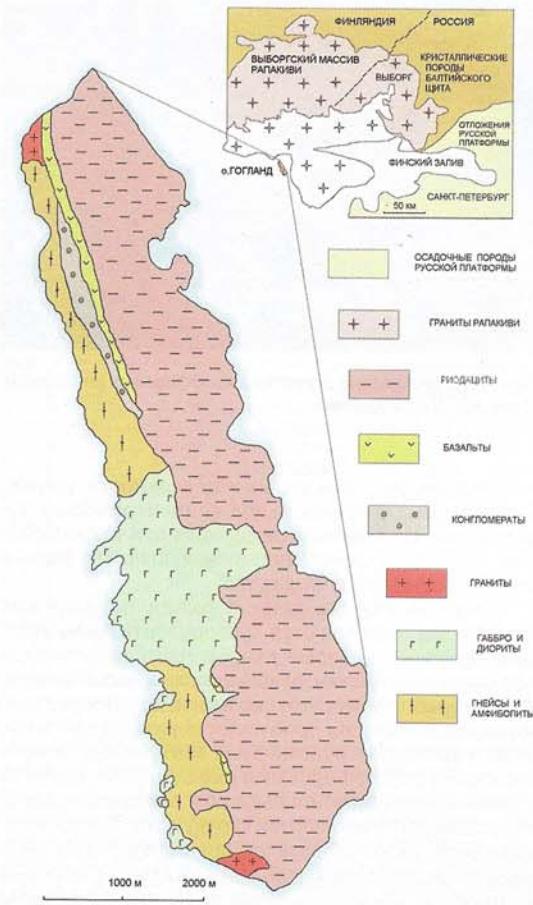


Рис. 1. Схема геологического строения о. Гогланд (сост. А. Беляев по материалам геологических съемок)



Рис. 2. Флюидальные фельзитоподобные породы в гнейсах фундамента

Чтобы полнее охарактеризовать геологические условия формирования и преобразования вулканических пород о. Гогланд, приведем описание особенностей некоторых пород, которые претерпели физическое и химическое изменение в результате воздействия высокотемпературных магм.

Гранитогнейсы фундамента (рис. 1) представляют собой средне-крупнозернистые гнейсовидные породы с характерной лепидогранобластовой структурой, сложенные линзовидными агрегатами зерен кварца 30–40, зональными кристаллами олигоклаза–андезина 27–32, микроклином 30–37, роговой обманкой и биотитом 2–7%.

Фельзитоподобные породы с флюидальной текстурой локализованы в узкой зоне (10–20 см) вдоль линии контакта гранитогнейсов с кварцевыми конгломератами. В стекловатую девитрифицированную и серicitизированную основную массу этих пород включены минералы, характерные для гранитогнейсов, – линзовидные агрегаты зерен кварца, плагиоклаз и микроклин. Среди гранитогнейсов параллельно трещинам отдельности (простижение северо-восточное 20°, падение крутое) встречаются маломощные ветвящиеся струи темно-серых фельзитоподобных пород с флюидальной текстурой (рис. 2), по облику напоминающих риодолиты. В стекловатую девитрифицированную и серicitизированную основную массу этих пород также включены минералы, характерные для гранитогнейсов, – линзовидные агрегаты зерен кварца, плагиоклаз и микроклин.

Кварцевые конгломераты и **кварциты** распространены в северо-западной части острова и обнажаются в виде узкой четырехкилометровой полосы, простирающейся на 340° (рис. 1). Они представлены пачкой пород мощностью до 30 м, субгоризонтально залегающей на гранитогнейсах фундамента. В кварцевых конгломератах тонкозернистый кварцевый цемент имеет конформно-регенерационные и мозаичные структуры. Гальки представлены метаморфическими кварцитами и кварцito-песчаниками. Гальки последних хорошо окатаны и окружены светло-серыми каемками толщиной 3–7 мм, в которых микроскопически наблюдается интенсивная серicitизация межзернового пространства.

Плагиопорфировые базалты мощностью от 0 до 40 м распространены в северной части острова (рис. 1) и залегают субгоризонтально на пачке кварцевых конгломератов и кварцитов. В составе этой пачки установлены (снизу вверх) плагиопорфировые базалты нижней толщи; полосчатые тонкозернистые кремнистые сланцы – микрокварциты в виде линзовидных тел видимой мощностью до 2 м и плагиопорфировые базалты верхней толщи с шаровыми лавами в основании.

Плагиопорфировые базалты нижней толщи, залегающие непосредственно на кварцевых конгломератах, в нижней части разреза представлены лавобрекциями с обломками вмещающих пород: микроклиновых гранитов, амфиболитов, гнейсов, кварцитовых галек. В основном это темно-серые трахитоидные породы с лейстами ($1,5 \times 1,0 \times 0,2$ см) плагиоклаза (40–50% An), с мелкозернистой микролитовой или девитрифицированной флюидальной основной массой. Структура пород порфировая и офитовая. Лейсты и микролиты плагиоклаза интенсивно серicitизированы.

Горизонт кремнистых сланцев залегает в виде субгоризонтальной линзы (мощность 0,5–2 м и простирианием до 100 м) между плагиопорфировыми базалтами верхней и нижней толщ. Массивные скрытокристаллические породы имеют отчетливую полосчатость, выраженную в чередовании коричневых и темно-серых полос. Микроскопически кремнистые сланцы представляют собой микрокварциты

с мозаичной структурой. При этом темные полосы содержат многочисленные мелкие включения девитрифицированного стекла, эпидотизированного и серицитизированного. Подобные кремнистые породы часто встречаются также среди плагиопорфировых базальтов верхней и нижней толщ в виде тонких, мощностью до 5 см, и субгоризонтальных прослоев, вероятно, фиксирующих кровли потоков, кроме того, они образуют каемки вокруг отдельных «подушек» шаровых лав.

Шаровые лавы с диаметром шаров 0,5–1 м в поперечнике обнаружены в подошвенной части верхней толщи плагиопорфировых базальтов, где они непосредственно залегают на полосчатых кремнистых сланцах. Пространство между шарами (3–5 см) заполнено кремнистой породой. В округлых «подушках» плагиопорфировых базальтов на определенных срезах наблюдается субконцентрическая трахитоидность, обусловленная ориентацией листов плагиоклаза. Размер вкрапленников плагиоклаза не изменяется от периферии к центру, что может указывать на присутствие фенокристаллов плагиоклаза в изливавшемся базальтовом расплаве. Девитрифицированная основная масса и листы плагиоклаза в краевых частях «подушек» интенсивно серицитизированы, в центральных частях этот процесс проявлен незначительно.

Плагиопорфировые базальты верхней толщи по минеральному составу и структурам аналогичны породам нижней толщи, однако микролиты основной массы и листы плагиоклаза серицитизированы в меньшей степени.

Порфировые риодакты залегают на пачке плагиоклазовых порфиридов. Они представлены массивными розовато-серыми и серыми породами, местами с флюидальными текстурами. В тонкоэзернистой, часто стекловатой основной массе наблюдаются вкрапленники (листы) калиевого полевого шпата ортоклаз-пертита (0,5–2,5 см в поперечнике), слагающие 5–10% объема породы и кварца (0,1–0,5 см в поперечнике) – 3–10% объема породы. Вкрапленники – листы калиевого полевого шпата имеют субгоризонтальную ориентировку, которая определяет трахитоидность породы. Порфировые риодакты имеют микрогранофировую и микроФельзитовую структуру основной массы, в которой проявлена вторичная серицитизация, а также встречаются скопления мелких идиоморфных кристаллов эпидота, хлорита, выделения магнетита и гематита. Округлые вкрапленники кварца с характерным для гранитов рапакиви равномерным погасанием и листы калиевого полевого шпата имеют заливы (cavities), выполненные микрокристаллической основной массой. Такие заливы, как правило, образуются при оплавлении или растворении вкрапленников под действием неравновесного с ними расплава.

В порфировых риодактах отсутствуют амфибол и биотит. Возможно, их не было во внедряющемся магматическом расплаве, либо впоследствии они были полностью замещены хлоритом, эпидотом и рудным минералом.

На восточном берегу острова в прибрежных обнажениях в порфировых риодактах наблюдаются своеобразные шарообразные обособления (1–2 м в поперечнике) с характерной для подушечных лав стекловатой зоной закалки и радиально расположенным трещинами с пустотами (рис. 3). В таких структурах листы калиевого полевого шпата



Рис. 3. Шарообразные структуры в порфировых риодактах (фото Ю. Б. Богданова)

ориентированы параллельно поверхности шаров, в поперечных разрезах видна концентрическая зональность. Во многих отношениях эти шарообразные структуры напоминают подушечные лавы в плагиопорфировых базальтах.

В нижних частях разреза толщи порфировых риодактов наблюдаются субгоризонтальные прослои брекчий, которые скорее всего приурочены к кровельным частям отдельных лавовых потоков. В некоторых случаях это, несомненно, автобрекчи, образовавшиеся при дроблении корки лавового потока, в которых и обломочный материал, и цемент представлены порфировыми риодактами. В других случаях цемент брекчий выглядит как светло-серый микрокварцит с мозаичной структурой. Кроме того, в средней части разреза толщи порфировых риодактов встречаются субгоризонтальные прослои мощностью 10–20 см, сложенные светло-серыми микрокварцитами с мозаичной структурой. Микрокварциты цемента брекчий и прослоев в порфировых риодактах по составу и структуре аналогичны кремнистым сланцам из толщи плагиопорфировых базальтов.

Изотопные и геохимические особенности пород. U-Pb изохронное датирование цирконов из порфировых риодактов, проведенное О. А. Левченковым в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН, показало их возраст 1638 ± 4 и 1640 ± 11 млн лет [7, 9], что совпадает с возрастом цирконов из гранитов рапакиви Выборгского массива. Рассчитанный на этот возраст $\varepsilon_{\text{Nd}} = -1 \pm 0,5$ для порфировых риодактов [7, 9] такой же, как и для гранитов рапакиви Выборгского массива [16].

По содержаниям основных петрогенных окислов (за исключением щелочей), а также концентрациям Ba, Rb, Sr и спектрам распределения редкоземельных элементов порфировые риодакты о. Гогланд наиболее близки к овощным амфибол-биотитовым гранитам рапакиви Выборгского массива [9, 16], тогда как порфировые риодакты заключительных фаз гранитов рапакиви отличаются низкими содержаниями Ba и Sr, а также спектрами распределения редкоземельных элементов с отчетливо выраженной европиевой аномалией (рис. 4, A). Кроме того, калиевый полевой шпат из вкрапленников порфировых риодактов по содержанию Ba 0,5–1, Rb 0,34–0,4, Sr 0,22–0,31% близок к калиевому полевому шпату овощам из

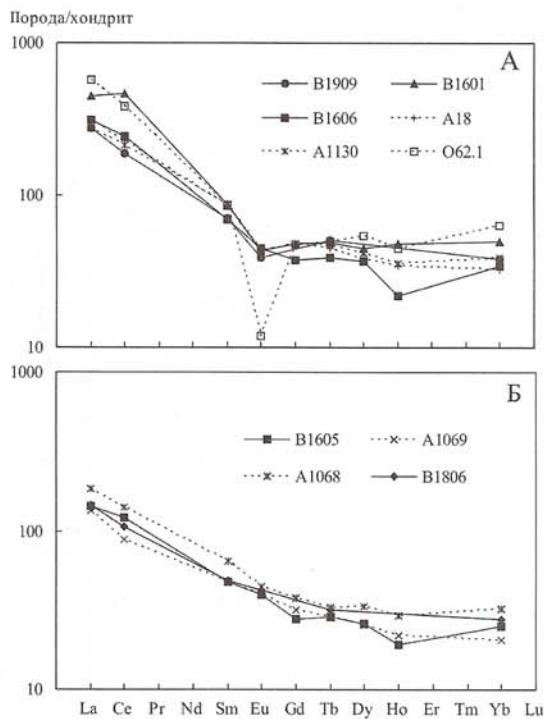


Рис. 4. Распределение редкоземельных элементов в вулканических породах острова Гогланд и породах Выборгского массива

А – в порфировых риодакитах острова – B1909, B1601, B1606, клинопироксен-фаялит-амфиболовых гранитах Выборгского массива – А18, А1130, а также в порфировых риодакитах из даек, прорывающих граниты рапакиви – О62.1 [16]; Б – в плагиопорфиритовых базальтах острова – B1605, B1806, габбро интрузии Ловасярви Выборгского массива – А1069 и диабазовой дайке – А1068 [16]

гранитов рапакиви Выборгского массива: Ba 0,5–1,3, Rb 0,51–0,59, Sr 0,2–0,3% [2].

На дискриминационных тектономагматических диаграммах Пирса [15] фигурационные точки составов порфировых риодакитов расположены в поле внутриплитных гранитов и находятся в пределах контура, ограничивающего распространение аноногенных гранитов рапакиви Выборгского массива (рис. 5), что также может указывать на генетическое родство магм гранитов рапакиви и порфировых риодакитов. Все это свидетельствует в пользу принадлежности гранитов рапакиви Выборгского массива и порфировых риодакитов о. Гогланд к единой вулкано-плутонической ассоциации.

Однако в пределах всей толщи кислых вулканитов устанавливаются аномально низкие (по сравнению с гранитами рапакиви Выборгского массива) содержания Na_2O 0,15–0,79 и повышенные K_2O 6,6–9,3%, что и определяет высокое отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 10–46 (табл. 1), тогда как в гранитах рапакиви это отношение редко вдвое выше. Резкое изменение соотношения щелочей в кварц-полевошпатовых порфирах по сравнению с гранитами рапакиви, возможно, связано с привносом калия и выносом натрия в метасоматическом процессе, сопровождавшемся серицитизацией девитрифицированной основной массы. Колебания содержаний Ba, Rb и Sr в кварц-полевошпатовых

Таблица 1
Химический состав порфировых риодакитов о. Гогланд

| Компоненты | B1601 | B1603 | B1606 | B1913 | B1909 |
|--|--------|--------|-------|-------|-------|
| SiO_2 | 70,06 | 73,69 | 69,76 | 69,00 | 70,5 |
| TiO_2 | 0,37 | 0,36 | 0,39 | 0,33 | 0,38 |
| Al_2O_3 | 13,75 | 14,01 | 14,72 | 13,20 | 13,40 |
| Fe_2O_3 | 4,59 | 3,15 | 2,56 | 3,1 | 3,1 |
| FeO | 0,01 | 0,01 | 1,89 | 1,2 | 1,2 |
| MnO | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,22 | 0,01 |
| MgO | 0,16 | 0,29 | 0,26 | 0,26 | 0,63 |
| CaO | 1,62 | 0,87 | 1,73 | 1,7 | 1,2 |
| Na_2O | 0,57 | 0,18 | 0,15 | 0,42 | 0,79 |
| K_2O | 8,28 | 6,59 | 7,11 | 9,3 | 7,7 |
| P_2O_5 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,11 | 0,13 |
| H_2O | 0,9 | 1,1 | 1,37 | 0,94 | 0,84 |
| Сумма | 100,36 | 100,31 | 100,0 | 99,78 | 99,88 |
| $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ | 14,5 | 36,6 | 47,4 | 22,1 | 9,7 |
| La | 135 | | 94 | | 82 |
| Ce | 388 | | 205 | | 157 |
| Sm | 18,3 | | 14,5 | | 15 |
| Eu | 3,2 | | 3,3 | | 2,9 |
| Tb | 2,4 | | 1,9 | | 2,5 |
| Yb | 8,5 | | 5,9 | | 6,5 |
| Ga | 15 | 15 | 12 | 15 | 15 |
| Rb | 283 | 261 | 231 | 209 | 233 |
| Sr | 102 | 98 | 111 | 185 | 143 |
| Y | 86 | 88 | 94 | 60 | 95 |
| Zr | 535 | 527 | 583 | 561 | 561 |
| Nb | 33 | 34 | 35 | 30 | 36 |
| Pb | 47 | 33 | 37 | 32 | 45 |
| Th | 41 | 42 | 40 | 27 | 39 |
| Va | 2046 | 1584 | 2842 | 1885 | 2872 |

Примечание: Породообразующие окислы, в мас. %; рассеянные элементы, в г/т (PCA, ВСЕГЕИ); редкоземельные элементы, в г/т (нейтронно-активационный анализ) (НИИЗК СПбГУ).

порфирах не обнаруживают значимых корреляционных связей с изменениями содержаний калия, при этом не нарушенными остаются изотопно-геохимическая система пород и спектры распределения редкоземельных элементов.

Цемент брекчий порфировых риодакитов и кварцитоподобные породы, сложенные эпидот-серпентит-кварцевым агрегатом, характеризуются очень высокими содержаниями SiO_2 79–87% и низкими Na_2O 0,15–0,21% на фоне концентраций K_2O 1,6–4,14%, что определяет аномально высокое отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 10–22 (табл. 2).

Плагиопорфиритовые базальты о. Гогланд по содержаниям основных петрогенных окислов (за исключением щелочей) и спектрам распределения редкоземельных элементов близки к габбро-анортозитам Выборгского массива и к диабазам из даек, секущих граниты рапакиви (рис. 4, Б). Плагиопорфиритовые базальты имеют $\varepsilon_{\text{Nd}} = -1,8 \pm 0,5$, рассчитанный на возраст 1640 млн лет [7, 9]. Близкие изотопные характеристики имеют габбро-анортозиты интрузии Ловасярви Выборгского массива и диабазы из даек, прорывающих амфибол-биотитовые граниты рапакиви [16]. Все это указывает на принадлежность габбро-анортозитов к единой вулкано-плутонической ассоциации.

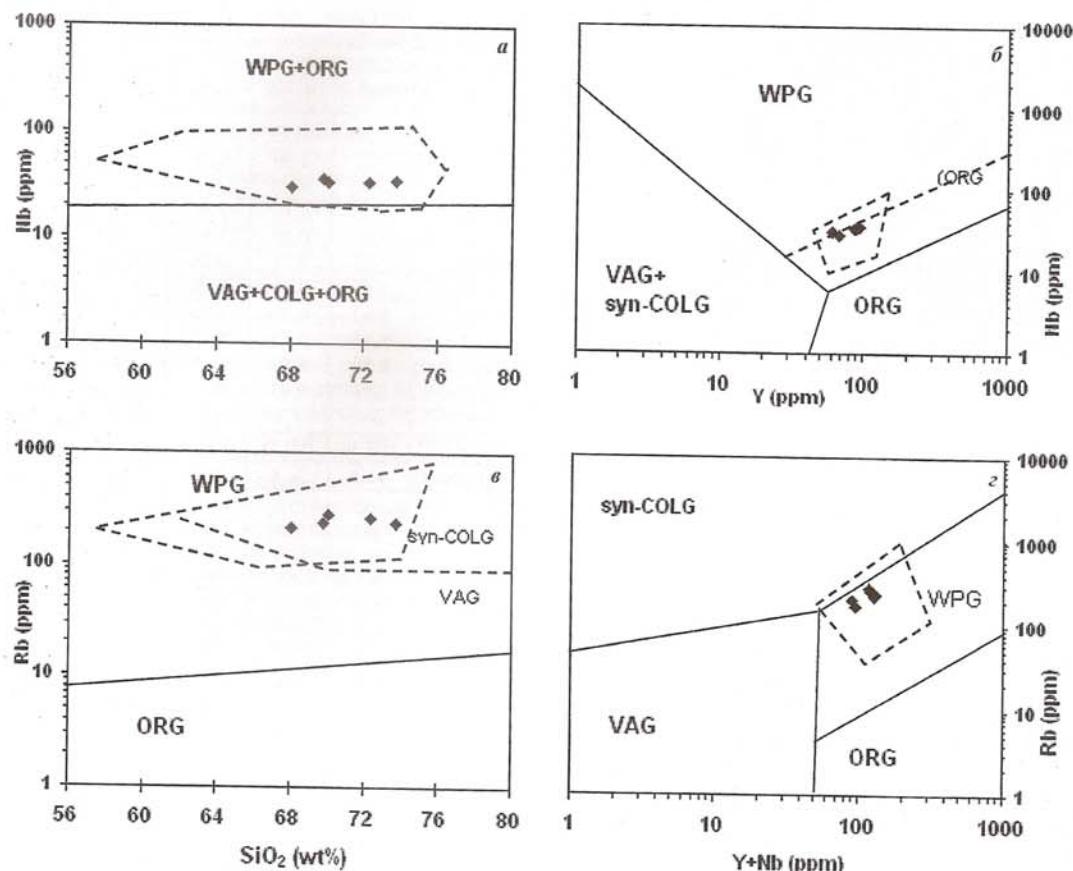


Рис. 5. Порфировые риодиты о. Гогланд (закрашенные ромбы) и гранитоиды Выборгского массива (пунктир) на тектономагматических дискриминационных диаграммах [15]. WPG – внутриплитные граниты, COLG – коллизионные граниты, syn-COLG – синколлизионные граниты, ORG – граниты океанических хребтов, VAG – граниты островных дуг

зитов Выборгского массива и плагиопорфировых базальтов о. Гогланд к единой вулкано-плутонической ассоциации.

Плагиопорфировые базальты нижней толщи характеризуются аномально низкими содержаниями Na_2O до 0,15 и повышенными K_2O до 4,7%. Такие концентрации щелочей и определяет высокое отношение в породе $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, достигающее 20 (табл. 3). Наименее измененные плагиопорфировые базальты верхней толщи по содержаниям щелочей отвечают щелочным базальтам и трахибазальтам: Na_2O 2,83–4,03 и K_2O 3,15–4,06% при отношении $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 0,95–1,1 (табл. 3).

В шаровых лавах наименее низкие содержания K_2O 1,3–1,8% характерны для центральных частей шаров из подушечных лав, для них же установлены и самые высокие «нормальные» содержания Na_2O 3,9–5,5 соответственно при отношении K_2O/Na_2O 0,3 (табл. 3). Это, по-видимому, составы, наиболее близкие к исходным базальтовым расплавам. В крае «подушек» содержания K_2O в 1,7–3 раза выше, чем в центральных частях, тогда как Na_2O в 1,4 раза ниже, при этом K_2O/Na_2O повышается от центра к краю

Таблица 2

| Компоненты | Цемент брекчий | Кварцитоподобные породы | | Кремнистые сланцы | |
|------------------------------------|-------------------|----------------------------|---------|----------------------|-------|
| | B1602 | B1604 | B1604-1 | B1807 | B1906 |
| SiO ₂ | 78,92 | 80,80 | 87,80 | 76,43 | 78,60 |
| TiO ₂ | 0,36 | 0,24 | 0,57 | 0,53 | 0,38 |
| Al ₂ O ₃ | 10,49 | 7,38 | 5,80 | 8,49 | 8,00 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,17 | 2,79 | 1,40 | 2,83 | 2,20 |
| FeO | 0,02 | 0,28 | 0,71 | 0,49 | 0,47 |
| MnO | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,04 | 0,02 |
| MgO | 0,29 | 0,64 | 0,42 | 1,74 | 1,40 |
| CaO | 0,54 | 3,25 | 0,18 | 4,01 | 3,80 |
| Na ₂ O | 0,21 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| K ₂ O | 4,14 | 3,37 | 1,60 | 3,87 | 3,70 |
| P ₂ O ₅ | 0,05 | 0,01 | 0,11 | 0,11 | 0,13 |
| H ₂ O | 0,90 | 1,02 | 0,97 | 0,99 | 0,78 |
| Сумма | 100,11 | 99,97 | 99,72 | 99,68 | 99,63 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 20 | 22 | 10.6 | 26 | 25 |

Примечание: Породообразующие окислы, в мас. % (PCA, ВСЕГЕИ).

Таблица 3

Химический состав плагиопорфировых базальтов о. Гогланд

| Компоненты | Плагиопорфировые базальты | | | | | | Шаровая структура 100 см | | Шаровая структура 60 см | |
|------------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------------------------|--------|
| | нижняя толща | | | верхняя толща | | | центр | край | центр | край |
| | B1605 | B1605-1 | B1810-1 | B1805 | B1806 | B1808 | B1908 | B1907 | B1907c | B1907k |
| SiO ₂ | 51,2 | 49,61 | 45,62 | 48,68 | 48,06 | 47,35 | 49,4 | 44,6 | 50,6 | 47,8 |
| TiO ₂ | 3,1 | 3,24 | 2,9 | 2,54 | 2,48 | 2,62 | 3,2 | 2,6 | 2,3 | 2,5 |
| Al ₂ O ₃ | 13,19 | 13,09 | 14,79 | 17,87 | 18,26 | 17,93 | 15,6 | 18,3 | 18,6 | 17,7 |
| Fe ₂ O ₃ | 15,99 | 14,7 | 7,74 | 5,76 | 8,35 | 7,37 | 9 | 7,5 | 7,1 | 6,8 |
| FeO | — | — | 8,47 | 6,65 | 3,36 | 3,92 | 5 | 4 | 3,7 | 4,3 |
| MnO | 0,18 | 0,16 | 0,18 | 0,11 | 0,1 | 0,14 | 0,09 | 0,18 | 0,1 | 0,15 |
| MgO | 3,13 | 3,14 | 5,81 | 2,14 | 1,83 | 4,67 | 3,3 | 5,8 | 3 | 5,5 |
| CaO | 7,9 | 10,42 | 7,85 | 7,34 | 7,51 | 4,95 | 6,6 | 7,3 | 4,8 | 5,5 |
| Na ₂ O | 0,87 | 0,33 | 0,15 | 2,83 | 3,54 | 4,03 | 3,9 | 2,8 | 5,5 | 3,8 |
| K ₂ O | 2,63 | 3,6 | 3,05 | 3,15 | 3,36 | 4,06 | 1,3 | 4,1 | 1,8 | 3,1 |
| P ₂ O ₅ | 0,71 | 0,69 | 1 | 0,93 | 0,92 | 0,81 | | | | |
| H ₂ O | 1,2 | 1,2 | 2,57 | 1,63 | 2,21 | 1,64 | 1,8 | 2 | 1,9 | 2,1 |
| Сумма | 100,1 | 100,18 | 100,13 | 99,63 | 99,99 | 99,49 | 99,19 | 99,18 | 99,4 | 99,25 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 3 | 11 | 20 | 1,1 | 0,95 | 1,0 | 0,3 | 1,5 | 0,3 | 0,8 |
| La | 43 | | | | 44 | | | | | |
| Ce | 101 | | | | 89 | | | | | |
| Sm | 10 | | | | 10 | | | | | |
| Eu | 2,9 | | | | 3,15 | | | | | |
| Tb | 1,4 | | | | 1,6 | | | | | |
| Yb | 4,2 | | | | 4,8 | | | | | |

Примечание: Породообразующие окислы, в мас. % (PCA, ВСЕГЕИ); редкоземельные элементы, в г/т (нейтронно-активационный анализ) (НИИЗК СПбГУ).

в 3–5 раз (табл. 3). Так как от центральных частей к краям подушек увеличивается степень серицитизации лейст плагиоклаза и микролитов основной массы, то достаточно резкое изменение соотношения щелочей скорее всего отражает процессы метасоматического замещения лейст плагиоклаза серицитом, при котором происходят привнос калия и вынос натрия. Содержания MgO также отчетливо увеличиваются от центральных частей (3–3,3%) к краевым (5,5–5,8%).

Полосчатые кремнистые сланцы, залегающие среди плагиопорфировых базальтов, характеризуются высокими содержаниями SiO₂ 76,4–80, K₂O 3,6–3,7% и низкими Na₂O 0,15% (K₂O/Na₂O 24). По особенностям химизма, минеральному составу и структуре кремнистые сланцы сходны с цементом брекчий в кварц-полевошпатовых порфирах (табл. 2).

Гранитогнейсы фундамента на удалении более 5 м от контакта с кварцевыми конгломератами (пр. B1903) имеют обычный для этих пород химический состав и концентрации K₂O 4,9 и Na₂O 2,7% при K₂O/Na₂O 1,8 (табл. 4).

В фельзитоподобных породах, распространенных на контакте с конгломератами (пробы B1901, B1905), содержания K₂O находятся на том же уровне, что и в гранитогнейсах, а содержания Na₂O снижаются до 0,22%, отношение K₂O/Na₂O достигает 20 (табл. 4).

В фельзитоподобных породах из ветвящихся струй (B1902) содержания K₂O 6,1, а Na₂O 0,28% при отношении K₂O/Na₂O 22. В фельзитоподобных по-

Таблица 4
Химический состав пород фундамента

| Компоненты | B1903 | B1901 | B1905 | B1902 |
|------------------------------------|-------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 71,7 | 69,6 | 69,2 | 68,8 |
| TiO ₂ | 0,27 | 0,28 | 0,32 | 0,32 |
| Al ₂ O ₃ | 13,5 | 15,4 | 17,8 | 16,6 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,6 | 2,7 | 1,3 | 1,7 |
| FeO | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,1 |
| MnO | 0,22 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| MgO | 1,0 | 2,1 | 1,4 | 1,8 |
| CaO | 1,2 | 1,6 | 1,7 | 1,6 |
| Na ₂ O | 2,7 | 0,22 | 0,68 | 0,28 |
| K ₂ O | 4,9 | 4,5 | 4,8 | 6,1 |
| P ₂ O ₅ | 0,1 | 0,09 | 0,13 | 0,1 |
| H ₂ O | 1,2 | 2,2 | 1,8 | 1,7 |
| Сумма | 99,79 | 100,13 | 100,35 | 100,12 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 1,8 | 20 | 7 | 22 |

Примечание: Гранитогнейс – B1903; фельзитоподобные породы у контакта с кварцитовыми конгломератами – B1901, B1905; фельзитоподобные породы из «струй» среди гранитогнейсов – B1902. Породообразующие окислы, в мас. % (PCA, ВСЕГЕИ).

породах по сравнению с гранитогнейсами несколько снижаются содержания SiO_2 при повышении концентраций Al_2O_3 , MgO и CaO (табл. 4).

Обсуждение результатов. Полученные данные свидетельствуют о том, что вулканиты о. Гогланда слагают субгоризонтальные покровы с шаровыми лавами, сформировавшиеся в подводных условиях. Изотопно-геохимические данные могут быть интерпретированы в пользу комагматичности порфировых риодазитов Гогланда и гранитов рапакиви Выборгского массива. Подобные порфировые риодазиты (фельзитпорфиры), субгоризонтально залегающие на породах свекофеннского фундамента, изучены А. Вормой [19] на территории провесов кровли у северо-восточного контакта Выборгского массива (оз. Рухолампи). Некоторые из этих порфировых риодазитов также обогащены K_2O до 7,18 и обеднены Na_2O до 0,83% при $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 8,7, тогда как другие имеют близкие к гранитам рапакиви содержания щелочей и соотношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 3$. Не обсуждая природы аномального соотношения щелочей, А. Ворма считает фельзитпорфиры комагматичными ранним интрузивным фазам рапакиви – лаппеегранитам и указывает на их сходство с порфировыми риодазитами Гогланда.

Порфировые риодазиты, ассоциирующие с массивами гранитов рапакиви и габбро-анортозитами, известны также в Финляндии, Китае, США, Бразилии. Иногда в них отмечаются аномальные содержание и соотношение щелочей – обогащение калием и обеднение натрием. Так, риолиты Марлоу Маунтайн (Миссури, США) содержат до 9% K_2O при Na_2O 0,12% и $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 74 [12].

Кислые вулканические породы с аномально низкими содержаниями натрия и высокими калием встречаются не только в комплексах рапакиви. Причины таких геохимических аномалий различны. В одних случаях они связаны с наложенными эндогенными метасоматическими процессами, такими как грейзенизация и серпентизация, в других с экзогенными процессами аргиллизации [11].

Повышение концентраций K_2O при одновременном снижении содержаний Na_2O в плагиопорфировых базальтах нижней толщи и в краевых частях «подушек» шаровых лав связано с процессом серпентизации стекловатой основной массы, микролитов и лейст плагиоклаза. Это сопровождалось метасоматическим привносом калия и выносом натрия. Инертное поведение Rb, Ba и Sr в метасоматическом процессе объясняется тем, что они в основном содержались в калиевых полевых шпатах вкрашенников, наименее подверженных серпентизации, а их привнос метасоматическими растворами мог быть незначителен. Зональность этого процесса, особенно отчетливо выраженная в шаровых структурах, дает основание предположить, что это результат взаимодействия основных лав с морской водой при подводном излиянии.

Взаимодействие базальтовых лав с морской водой достаточно хорошо изучено как для современного подводного вулканализма в океанах, так и для палеотипных базальтовых лавовых толщ – спилитов [5]. Однако для спилитизации характерны четко выраженное повышение содержания натрия и дефицит калия, обусловленные процессами вторичной альбитизации пород при их взаимодействии с насыщенной натрием морской водой. Так как океаническая морская вода содержит натрия в десять раз больше, чем калия, то в результате воздействия ее

на базальтовые лавы происходит обогащение краевых частей базальтовых подушек натрием и выщелачивание из них калия. В некоторых современных шаровых лавах и палеотипных базальтах собственно спилит (обогащенная натрием и обедненная калием порода основного состава) слагает только оболочки подушечных обособлений, тогда как центральные части сложены неизмененным базальтом. Эксперименты, проведенные при нагревании образцов базальтов в морской воде, показали, что в породах увеличивается содержание Mg [5].

Однако как в основных, так и кислых вулканитах Выборгского массива взаимодействие с водой во время подводного излияния сопровождалось выносом натрия и привносом калия и выразилось в серпентизации девитрифицированной основной массы и лейст плагиоклаза. Поэтому можно предположить, что в данном случае нагретая лавой вода бассейна, по-видимому, была в некоторой степени обогащена калием. Вместе с тем, отчетливое повышение содержания MgO в краевых частях шаровых структур может указывать на присутствие в этой воде магния, что характерно для морской воды.

Насыщение морской воды калием могло происходить непосредственно перед подводным излияниеммагм под воздействием передовых флюидов, которые при формировании массива гранитов рапакиви помагмоподводящим разломам достигали поверхности. Доказательства существования и возможности отщепления отмагмы рапакиви высококалиевых флюидов были получены ранее при изучении гранитов рапакиви Салминского массива. В северо-восточном экзоконтакте этого массива в кварц-биотит-плагиоклазовых роговиках установлены овойдоподобные метакристаллы калиевого полевого шпата до 8 см в поперечнике, сходные с овойдами гранитов рапакиви. Некоторые из них окружены плагиоклазовыми оболочками. Rb-Sr изотопный возраст формирования минералов метасоматически измененных роговиков с порфиробластами калиевого полевого шпата в роговиках составляет 1515 ± 33 млн лет [6, 18]. Эти данные хорошо согласуются с возрастом формирования гранитов рапакиви Салминского массива – 1550 млн лет [8]. Предполагается, что порфиробласты калиевого полевого шпата в роговиках сформированы под воздействием высококалиевого флюида, отщепленного отмагмы гранитов рапакиви.

Источником флюидов, первоначально обогативших морскую воду калием, могли быть материнскиемагмы высококалиевых базальтов. Обычно при вулканических извержениях передовые флюиды первыми достигают поверхности, а в морях и океанах они активно взаимодействуют с морской водой и приводят крудообразованию в виде железомарганцевых конкреций ирудных корок.

Полосчатые кремнистые сланцы в плагиопорфировых базальтах и цемент брекчий в кварц-полевошпатовых порфирах имеют сходный минеральный и химический состав и, очевидно, изначально представляли собой хемогенные кремнистые осадки. Они образовались в процессе взаимодействия горячих лав с морской водой, которая нагревалась до высоких температур и активно растворяла силикатное вещество на поверхности потока, насыщаясь оксидом кремния. При подъеме этих горячих минерализованных вод в верхние, более холодные горизонты морского бассейна растворимость в них оксида кремния резко уменьшалась, в результате

чего на поверхность лавовых потоков выпадали хемогенные кремнийсодержащие осадки вместе с пепловым материалом. При излиянии новых порций лавовых потоков на эти осадки они, при высоких температурах и под давлением вышележащих толщ, претерпели контактовый метаморфизм и превратились в кремнистые породы.

Базальтовые лавы в подводных условиях изливались на несцементированные песчано-галечные отложения, заполнявшие понижения рельефа в породах фундамента и насыщенные морской водой. В результате контактового метаморфизма эти осадочные породы превратились в кварцевые конгломераты и кварциты. Серизитизация по краям окатанных галек кварцитопесчаников также могла произойти из-за воздействия на них нагретой морской воды, обогащенной калием.

Фельзитоподобные породы, обнаруженные среди гнейсов в виде ветвящихся струй и залегающие непосредственно под толщей кварцевых конгломератов, по всей видимости, представляли собой результат частичного плавления коры выветривания гранитогнейсов под воздействием высокотемпературных высококалиевых флюидов, в которые превратилась морская вода, нагретая базальтовой лавой. Химический состав пород из кор выветривания обычно отличается от материнской породы повышенным содержанием Al_2O_3 за счет появления в них глинистой фракции и пониженным содержанием MnO из-за выноса марганца поверхностными водами (табл. 4).

Процессы серизитизации в породах фундамента, кварцевых конгломератах, плагиопорфировых базальтах, кремнистых сланцах и порфировых риодакитах по времени, несомненно, связаны с формированием пород формации рапакиви. Никаких фактических свидетельств и предположений в пользу существования в более позднее время столь масштабных геологических процессов, способных метасоматически преобразовать более чем стометровые толщи монолитных горных пород, в опубликованной литературе не имеется.

Выводы

1. Толши плагиопорфировых базальтов и порфировых риодакитов с характерными шаровыми структурами сформировались при подводном излиянии лав.

2. Геохимические и изотопно-геохимические данные подтверждают, что порфировые риодакиты могли сформироваться из магмы, родоначальной для гранитов рапакиви, и образуют с ними единую вулкано-плутоническую ассоциацию. Плагиопорфировые базальты кристаллизовались из основных расплавов, родственных габбро-анортозитам Выборгского комплекса, также принадлежат к единой вулкано-плутонической ассоциации.

3. Повышенные концентрации K_2O и аномально низкие содержания Na_2O в кислых и основных породах о. Гогланд связаны с метасоматическими процессами серизитизации стекловатой основной массы, микролитов и лейст плагиоклаза и определялись взаимодействием вулкаников с насыщенной калием горячей морской водой во время подводного излияния.

4. Фельзитоподобные породы, распространенные в гранитогнейсах в виде ветвящихся струй и локализованные вдоль линии контакта с конгломератами, представляют собой результат воздействия

на коры выветривания гранитогнейсов фундамента насыщенной калием морской воды, нагретой базальтовой лавой во время подводного излияния.

5. Предполагается, что нагретая лавой морская вода бассейна имела необычный солевой состав. Возможно, что при формировании Выборгского массива рапакиви по магмоподводящим разломам, достигающим поверхности, двигались передовые флюиды, активно насыщающие воду бассейнов калием непосредственно перед подводным излиянием магм.

Работа выполнена при финансовой поддержке International Science Foundation (ISF grant RI E000) и РФФИ (гранты 94-05-17033, 95-05-15305, 97-05-65446).

1. Беляев А.М. Минерало-геохимическая специализация гранитов рапакиви Выборгского массива // Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 1983. Вып. 1 (№ 6). – С. 17–26.

2. Беляев А.М., Рундквист Н.Д., Шапкина Ю.С. Состав и структура овощей калиевого полевого шпата в гранитах рапакиви // Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 1990. № 12. – С. 17–26.

3. Беляев А.М., Богданов Ю.Б., Шебанов А.Д., Левченков О.А. Возраст и петролого-геохимические особенности вулканитов о. Гогланд (Выборгский массив, Россия) // Закономерности эволюции земной коры. – СПб., 1996. Т. 2. – С. 41.

4. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Под ред. О.А. Богатикова, О.В. Петрова, А.Ф. Морозова. Изд. третье. – СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. – 200 с.

5. Фрих-Хар Д.И. О взаимодействии морской воды с магматическим веществом // Сов. геология. 1982. № 10. – С. 93–99.

6. Шебанов А.Д., Беляев А.М., Ермош Н.Г., Саватенков В.М. Минералогические особенности метасоматитов в контактовом ореоле Салминского массива: оценка роли автометасоматических процессов при формировании гранитов рапакиви // Закономерности эволюции земной коры. 1996. Т. 2. – С. 191.)

7. Шульдинер В.И., Богданов Ю.Б., Левченков О.А. и др. Возраст фундамента хогланской серии (о. Гогланд) // Материалы II российской конф. по изотопной геохронологии. – СПб., 2003. – С. 34.

8. Amelin Y., Belyaev A., Larin A., Neymark L., Stepanov K. Salmi batholith and Pitkaranta ore field in Soviet Karelia. IGCP-315, Finland, Helsinki, 1991. – 57 p.

9. Belyaev A.M., Bogdanov Y.B., Levchenkov O.A., Shebanov A.D. Bimodal volcanic formation of Wiborg batholith on the Island of Hogland (Suursaari), Russia // Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.), Helsinki, Finland, 1996. – P. 5.

10. Belyaev A.M., Bogdanov Y.B., Levchenkov O.A. Petrogenesis of the bimodal rapakivi-related volcanites of the Island of Hogland, 1.64 Ga Wiborg batholith, Russia // Intern. Field Conf. Proterozoic Granite System of the Penokean Terrain in Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA, 1998. – P. 139–140.

11. Forster H.-J., Gottesmann B., Tischendorf G. et al. Permo-Carboniferous subvolcanic rhyolitic dikes in the Western Erzgebirge/Vogtland, Germany: a record of source heterogeneity of post-collisional felsic magmatism // Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen. 2007. 183. 2. – P. 23–147.

12. Kisvarsanyi E.B. Petrochemistry of Precambrian igneous province, St. Francois Mountains, Missouri // Report of Investigations. N 51. Rolla, Missouri, USA, 1972. – 97 p.

13. Kranck E.N. A stereogram of Suursaari (Hogland) // Fennia 50. 1928. N 18. – 10 p.

-
14. Lemberg J. Die Gebirgsarten der Insel Hochland, chemisch-geognostisch untersucht // Archiv fur die Naturk. Liv-, Esth-, und Kurlands. Erste Serie B. IV. 1868.
 15. Pearce J.A., Harris N.B., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *J. of Petrology*. 1984. — P. 956–983.
 16. Rämö O.T. Petrogenesis of the Proterozoic rapakivi granites and related basic rocks of Southeastern Fennoscandia; Nd and Pb isotopic and general geochemical constraints // *Geol. Surv. Finland*. 1991. Bull. 355. — 161 p.
 17. Ramsay W. Om Hoglands geologiska byggnad // *Forhandlingar*, Stockholm, 1890. — P. 471–490.
 18. Savatenkov V.M., Shebanov A.D., Belyaev A.M. Age, source, and conditions of formations of phenocryst-like quartz and ovoid-like alkali feldspar megacrysts in an altered hornfels at the contact aureole of the Salmi rapakivi batholith, Russian Karelia // *Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale* (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.). Helsinki, Finland, 1996. — P. 62.
 19. Vorma A. On two roof pendants in the Wiborg rapakivi massif, Southeastern Finland // *Geological Survey of Finland Bull.* 272, Geologinen tutkimuslaitos Espoo, 1975. — P. 2–46.
 20. Wahl W. A composite lava flow from Lounatkorkia, Hogland // *Bull. de la Commission géologique de Finlande*. 1947. N 140. — P. 287–301.

Беляев Анатолий Михайлович — канд. геол.-минер. наук, доцент, СПбГУ. <abel-7-777@yandex.ru>.