

ПЕТРОЛОГИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД ФОРМАЦИИ РАПАКИВИ (о. ГОГЛАНД)

Геологические, геохимические и изотопно-геохимические исследования вулканитов на о. Гогланд подтвердили, что порфировые риодациты (1638–1640 млн лет), входящие в состав хогландской 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 излияний 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, риодациты, базальты, подушечные лавы, кварциты, конгломераты, кремнистые сланцы, гранитогнейсы, граниты рапакиви, коры выветривания, метасоматоз, серицитизация.*

Geological, geochemical and isotope-geochemical researches of volcanites 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 hydrotherms were formed due to release of fluids derived from high potassium magmas of the basalts and rapakivi granite into sea waters.

Keywords: *rapakivi formation, Wiborg 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 эффузивных аналогов гранитов рапакиви. На о. Гогланд, расположенном в Финском заливе у южной границы Выборгского массива рапакиви, обнажаются мощные толщи кислых вулканических пород, согласно Петрографическому кодексу [4] относящиеся к порфировым риодацитам. Эти породы, именуемые предыдущими исследователями кварц-полевошпатовыми порфирами [13, 17, 20], образовались из магмы, родоначальной для гранитов рапакиви. Однако результаты изучения химического состава порфировых риодацитов [3, 8–10, 14] показали более высокие содержания в них щелочей по сравнению с гранитами рапакиви. Так, концентрации K_2O в порфировых риодацитах 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 – сложно-дислоцированные гранитогнейсы и амфиболиты палеопротерозоя, которые прорваны интрузиями синкинематических перидотитов, габбро-норитов, кварцевых диоритов, посткинематических гранитоидов и пегматитов. На породах фундамента субгоризонтально залегают образования хогландской свиты, в составе которой выделяются снизу вверх три пачки пород: кварцевые конгломераты и кварциты 0–30 м; плагиопорфировые базальты 0–40 м; порфировые риодациты до 110 м.

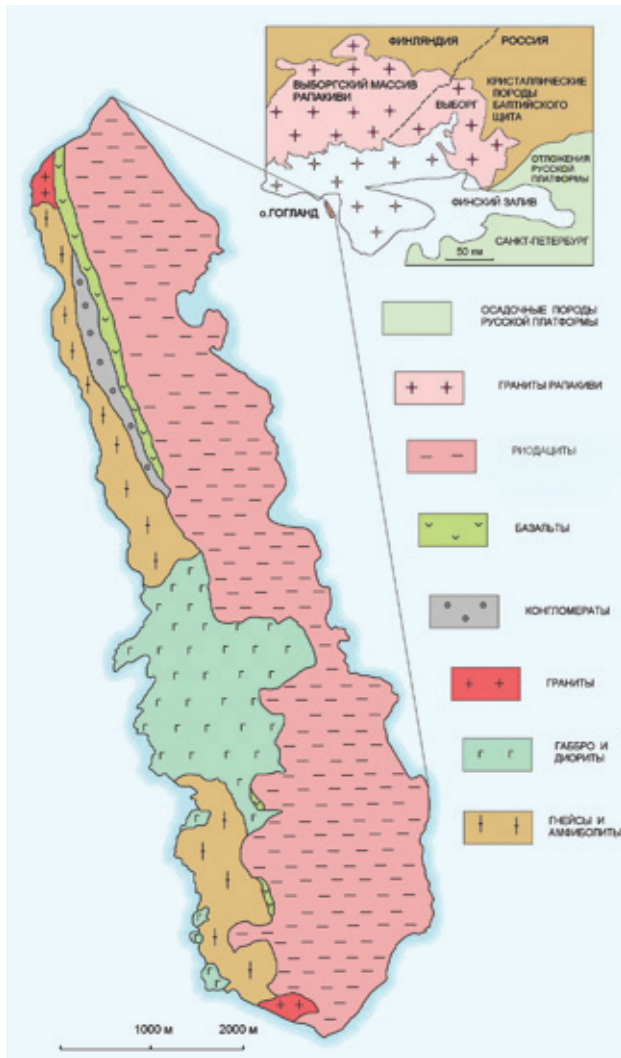


Рис. 1. Схема геологического строения о. Гогланд (сост. А. Беляев по материалам геологических съемок)



Рис. 2. Флюидалные фельзитоподобные породы в гранитоидных фундаментах

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

Гранитоидные породы 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 флюидалной текстурой локализованы в узкой зоне (10–20 см) вдоль линии контакта гранитоидов с кварцевыми конгломератами. В стекловатую девитрифицированную и серицитизированную основную массу этих пород включены минералы, характерные для гранитоидов, – линзовидные агрегаты зерен кварца, плагиоклаз и микроклин. Среди гранитоидов параллельно трещинам отдельности (простирающие северо-восточное 20°, падение крутое) встречаются маломощные ветвящиеся струи темно-серых фельзитоподобных пород с флюидалной текстурой (рис. 2), по облику напоминающих риодациты. В стекловатую девитрифицированную и серицитизированную основную массу этих пород также включены минералы, характерные для гранитоидов, – 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 гранитоидных фундаментах. В кварцевых конгломератах тонкозернистых кварцевый цемент имеет конформно-регенерационные и мозаичные структуры. Гальки представлены метаморфогенными кварцитами и кварцито-песчаниками. Гальки последних хорошо окатаны и окружены светло-серыми каемками толщиной 3–7 мм, в которых микроскопически наблюдается интенсивная серицитизация межзернового пространства.

Плагипорфировые базальты 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) плагипорфировые базальты нижней толщи; полосчатые тонкозернистые кремнистые сланцы – микрокварциты в виде линзовидных тел видимой мощностью до 2 м и плагипорфировые базальты верхней толщи с шаровыми лавами в основании.

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

Горизонт кремнистых сланцев залегают в виде субгоризонтальной линзы (мощностью 0,5–2 м и простираемостью до 100 м) между плагипорфировыми базальтами 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 лейст плагиоклаза. Размер вкрапленников плагиоклаза не изменяется от периферии к центру, что может указывать на присутствие фенокристаллов плагиоклаза в излившемся базальтовом расплаве. Девитрифицированная основная масса и лейсты 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 лейсты плагиоклаза серицитизированы в меньшей степени.

Порфиновые риодациты залегают на пачке плагиоклазовых порфиритов. Они представлены массивными розовато-серыми и серыми породами, местами с флюидальными текстурами. В тонкозернистой, часто стекловатой основной массе наблюдаются вкрапленники (лейсты) 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 – лейсты калиевого полевого шпата имеют субгоризонтальную ориентировку, которая определяет трахитоидность породы. Порфиновые риодациты 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 лейсты калиевого полевого шпата имеют заливки (cavities), выполненные микрокристаллической основной массой. Такие заливки, как правило, образуются при оплавлении или растворении вкрапленников под действием неравновесного с ними расплава.

В порфиновых риодацитах 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 порфиновых риодацитах наблюдаются своеобразные шарообразные обособления (1–2 м в поперечнике) с характерной для подушечных лав стекловатой зоной закалки и радиально расположенными трещинами с пустотами (рис. 3). В таких структурах лейсты калиевого полевого шпата



Рис. 3. Шарообразные структуры в порфиновых риодацитах (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 порфиновых риодацитов наблюдаются субгоризонтальные прослои брекчий, которые скорее всего приурочены к кровельным частям отдельных лавовых потоков. В некоторых случаях это, несомненно, автобрекчии, образовавшиеся при дроблении корки лавового потока, в которых и обломочный материал, и цемент представлены порфировыми риодацитами. В других случаях цемент брекчий выглядит как светло-серый микрокварцит с мозаичной структурой. Кроме того, в средней части разреза толщи порфиновых риодацитов встречаются субгоризонтальные прослои мощностью 10–20 см, сложенные светло-серыми микрокварцитами с мозаичной структурой. Микрокварциты цемента брекчий и прослоев в порфиновых риодацитах по составу и структуре аналогичны кремнистым сланцам из толщи плагиопорфировых базальтов.

Изотопные и геохимические особенности пород. U–Pb изохронное датирование цирконов из порфиновых риодацитов, 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 $\varepsilon_{Nd} = -1 \pm 0,5$ для порфиновых риодацитов [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 порфиновые риодациты о. Гогланд наиболее близки к овоидным амфибол-биотитовым гранитам рапакиви Выборгского массива [9, 16], тогда как порфиновые риодациты заключительных фаз гранитов рапакиви отличаются низкими содержаниями Ba и Sr, а также спектрами распределения редкоземельных элементов с отчетливо выраженной европиевой аномалией (рис. 4, А). Кроме того, калиевый полевой шпат из вкрапленников порфиновых риодацитов по содержанию Ba 0,5–1, Rb 0,34–0,4, Sr 0,22–0,31% близок к калиевому полевоому шпату овоидов из

Химический состав порфировых риодацитов 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 ₂ O ₃	13,75	14,01	14,72	13,20	13,40
Fe ₂ O 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 ₂ O	0,57	0,18	0,15	0,42	0,79
K ₂ O	8,28	6,59	7,11	9,3	7,7
P ₂ O ₅	0,03	0,03	0,01	0,11	0,13
H ₂ O	0,9	1,1	1,37	0,94	0,84
Сумма	100,36	100,31	100,0	99,78	99,88
K₂O/Na₂O	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
Ba	2046	1584	2842	1885	2872

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

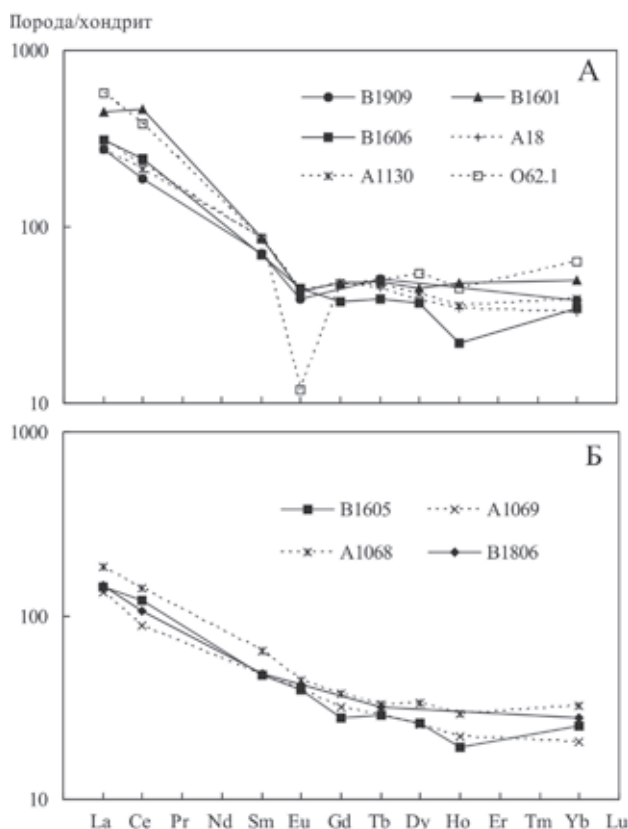


Рис. 4. Распределение редкоземельных элементов в вулканах о. Гогланд и породах Выборгского массива

А – в порфировых риодацитах острова – B1909, B1601, B1606, клинопироксен-фаялит-амфиболовых гранитах Выборгского массива – A18, A1130, а также в порфировых риодацитах из даек, прорывающих граниты рапакиви – O62.1 [16]; Б – в плагиопорфировых базальтах острова – B1605, B1806, габбро интрузии Ловасярви Выборгского массива – A1069 и диабазовой дайке – A1068 [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] фигуративные точки составов порфировых риодацитов расположены в поле внутриплитных гранитов и находятся в пределах контура, ограничивающего распространение анорогенных гранитов рапакиви Выборгского массива (рис. 5), что также может указывать на генетическое родство магм гранитов рапакиви и порфировых риодацитов. Все это свидетельствует в пользу принадлежности гранитов рапакиви Выборгского массива и порфировых риодацитов о. Гогланд к единой вулcano-плутонической ассоциации.

Однако в пределах всей толщи кислых вулкани-тов устанавливаются anomalно низкие (по сравнению с гранитами рапакиви Выборгского массива) содержания Na₂O 0,15–0,79 и повышенные K₂O 6,6–9,3%, что и определяет высокое отношение K₂O/Na₂O 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 привнесом калия и выносом натрия в метасоматическом процессе, сопровождавшемся серицитизацией девитрифицированной основной массы. Колебания содержания Ba, Rb и Sr в кварц-полевошпатовых

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 риодацитов и кварцитоподобные породы, сложенные эпидот-серицит-кварцевым агрегатом, характеризуются очень высокими содержаниями SiO₂ 79–87% и низкими Na₂O 0,15–0,21% на фоне концентраций K₂O 1,6–4,14%, что определяет anomalно высокое отношение K₂O/Na₂O 10–22 (табл. 2).

Плагиопорфировые базальты о. Гогланд по содержанию 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). Плагиопорфировые базальты имеют $\epsilon_{Nd} = -1,8 \pm 0,5$, 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-анорто-

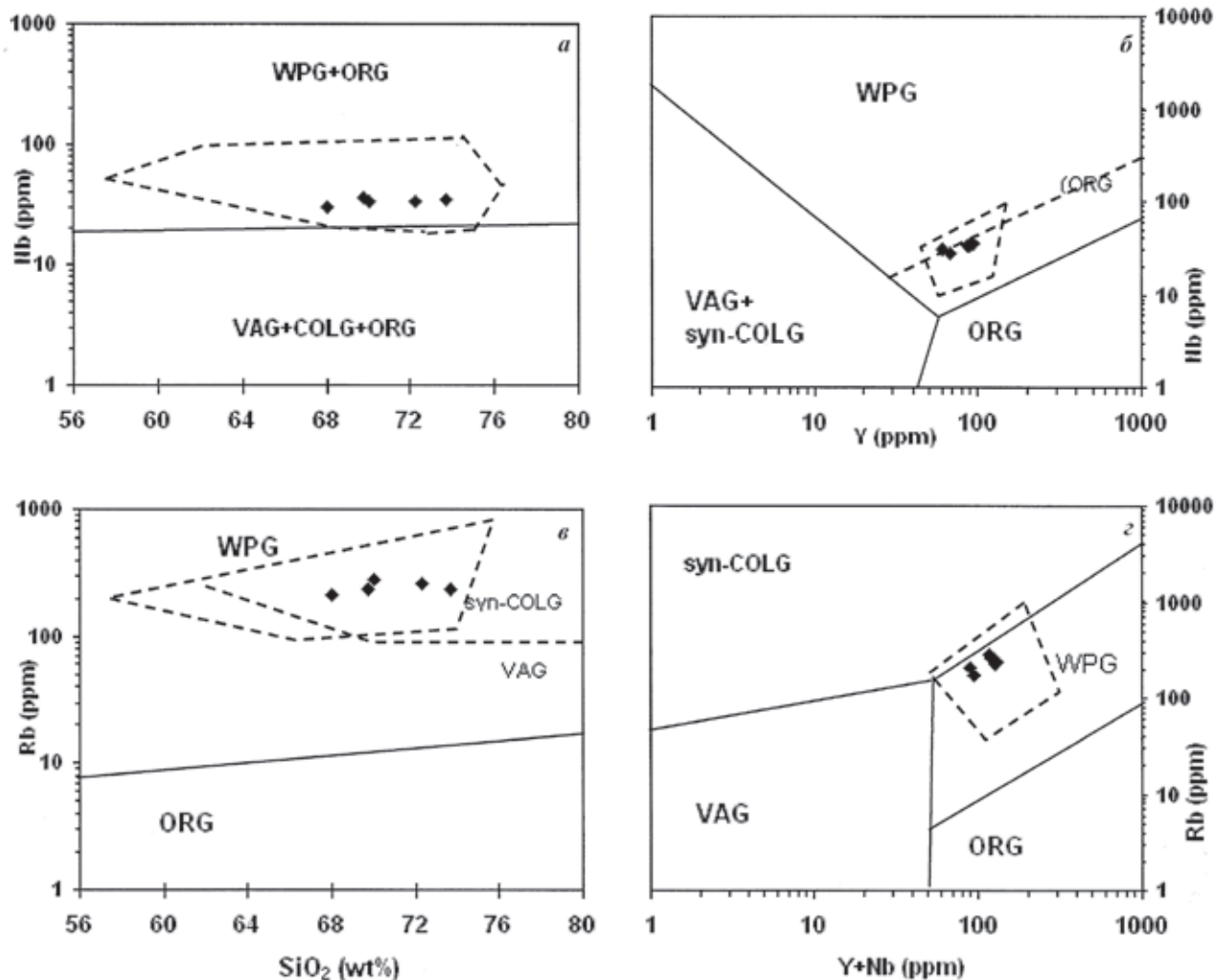


Рис. 5. Порфировые риодациты о. Гогланд (закрашенные ромбы) и гранитоиды Выборгского массива (пунктир) на тектономагматических дискриминационных диаграммах [15]

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 вулcano-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 наиболее 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 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 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 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ повышается от центра к краю

Таблица 2

Химический состав цемента брекчий, кварцитоподобных пород из прослоев в порфировых риодацитах и кремнистых сланцев в толще плагиопорфировых базальтов

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_2O_3	10,49	7,38	5,80	8,49	8,00
Fe_2O_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_2O	0,21	0,15	0,15	0,15	0,15
K_2O	4,14	3,37	1,60	3,87	3,70
P_2O_5	0,05	0,01	0,11	0,11	0,13
H_2O	0,90	1,02	0,97	0,99	0,78
Сумма	100,11	99,97	99,72	99,68	99,63
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	20	22	10,6	26	25

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

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	B1907с	B1907к
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
Na₂O	0,87	0,33	0,15	2,83	3,54	4,03	3,9	2,8	5,5	3,8
K₂O	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
K₂O/Na₂O	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. % (РСА, 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 происходит 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. В1903) 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 В1901, В1905), 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 (В1902) содержания K₂O 6,1, а Na₂O 0,28% при отношении K₂O/Na₂O 22. В фельзитоподобных по-

Таблица 4
Химический состав пород фундамента

Компоненты	В1903	В1901	В1905	В1902
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
Na₂O	2,7	0,22	0,68	0,28
K₂O	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
K₂O/Na₂O	1,8	20	7	22

Примечание: Гранитогнейс – В1903; фельзитоподобные породы у контакта с кварцевыми конгломератами – В1901, В1905; фельзитоподобные породы из «струй» среди гранитогнейсов – В1902. Породообразующие окислы, в мас. % (РСА, ВСЕГЕИ).

родах по сравнению с гранитоидными породами несколько снижается содержание SiO_2 при повышении концентраций Al_2O_3 , MgO и CaO (табл. 4).

Обсуждение результатов. Полученные данные свидетельствуют о том, что вулканы о. Гогланд слагают субгоризонтальные покровы с шаровыми лавами, сформировавшиеся в подводных условиях. Изотопно-геохимические данные могут быть интерпретированы в пользу комагматичности порфировых риодацитов Гогланда и гранитов рапакиви Выборгского массива. Подобные порфировые риодациты (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 риодацитов 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 – лаптеегранитам и указывает на их сходство с порфировыми риодацитами Гогланда.

Порфировые риодациты, ассоциирующие с массивами гранитов рапакиви и габбро-анортозитами, известны также в Финляндии, Китае, США, Бразилии. Иногда в них отмечаются аномальные содержания и соотношение щелочей – обогащение калием и обеднение натрием. Так, риолиты Марлоу Маунтаин (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 калия 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 серицитизация, в других с экзогенными процессами аргиллизации [11].

Повышение концентраций K_2O при одновременном снижении содержания Na_2O в плагио-порфировых базальтах нижней толщи и в краевых частях «подушек» шаровых лав связано с процессом серицитизации стекловатой основной массы, микролитов и лейст плагиоклаза. Это сопровождалось метасоматическим привнесением калия и выносом натрия. Инертное поведение Rb, Ba и Sr в метасоматическом процессе объясняется тем, что они в основном содержались в калиевых полевых шпатах вкрапленников, наименее подверженных серицитизации, 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 вулканизма 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 неизменным 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 вулканах Выборгского массива взаимодействие с водой во время подводного излияния сопровождалось выносом натрия и привнесением калия и выразилось в серицитизации 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 излиянием магм под воздействием передовых флюидов, которые при формировании массива гранитов рапакиви по магмоподводящим разломам достигали поверхности. Доказательства существования и возможности отщепления от магмы рапакиви высококалиевых флюидов были получены ранее при изучении гранитов рапакиви Салминского массива. В северо-восточном экзоконтакте этого массива в кварц-биотит-плагиоклазовых роговиках установлены овоидоподобные метакристаллы калиевого полевого шпата до 8 см в поперечнике, сходные с овоидами гранитов рапакиви. Некоторые из них окружены плагиоклазовыми оболочками. Rb-Sr изотопный возраст формирования минералов метасоматически измененных роговиков с порфиробластами калиевого полевого шпата 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 от магмы гранитов рапакиви.

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

Полосчатые кремнистые сланцы в плагио-порфировых 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 пелловыми материалами. 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. Серицитизация 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 высококалийевых 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 серицитизации в породах фундамента, кварцевых конгломератах, плагиопорфировых базальтах, кремнистых сланцах и порфировых риодацитах 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. Толщи плагиопорфировых базальтов и порфировых риодацитов с характерными шаровыми структурами сформировались при подводном излиянии лав.

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

3. Повышенные концентрации K_2O и аномально низкие содержания Na_2O в кислых и основных породах о. Гогланд связаны с метасоматическими процессами серицитизации стекловатой основной массы, микролитов и лейст плагиоклаза и определялись взаимодействием вулканитов 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.* Минералого-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 овоидов 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 автосоматических 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 хогландской 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 Penockean 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. *Franch 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 für 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 geologique de Finlande*. 1947. N 140. — P. 287–301.

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