

УДК 551.305.1

## ПРИРОДА ВТОРИЧНЫХ КВАРЦИТОВ ОСТРОВА БОЛЬШОЙ ТЮТЕРС (ФИНСКИЙ ЗАЛИВ, РОССИЯ)

© 2017 г. Е. Н. Терехов<sup>1</sup>, А. Б. Макеев<sup>2</sup>, В. Ю. Прокофьев<sup>2</sup>, Т. Ф. Щербакова<sup>1</sup>,  
А. С. Балувев<sup>1</sup>, Б. В. Ермолаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7, e-mail: tereh@ilran.ru

<sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: abmakeev@igem.ru

Поступила в редакцию 12.12.2016 г.; принята к печати 03.03.2017 г.

Территория Балтийского щита хорошо изучена, и выявление принципиально новых геологических образований – редкая удача. Благодаря Русскому географическому обществу летом 2015 г. была осуществлена комплексная экспедиция по исследованию природы малоизученных Внешних островов Финского залива. Работами экспедиции в центральной части Финского залива на острове Большой Тюттерс были выявлены большие объемы существенно кварцевых пород ( $\text{SiO}_2$  более 90%). В результате комплексного изучения кварцитов, включающих петрогеохимические, микронзондовые, изотопные, термобарогеохимические исследования и хроматографический анализ газов, можно утверждать, что породы являются вторичными кварцитами, образовавшимися под влиянием углекислотных растворов. Наличие теневых структур мигматитов, а также минералогические особенности кварцитов, дают основание считать, что исходными породами, по которым образовались вторичные кварциты могли быть сланцы свекофеннского комплекса. Температура гомогенизации газовой-жидких включений 330–370°C, что указывает на высокотемпературную фацию вторичных кварцитов. Возраст даек гранитного состава, прорывающих вторичные кварциты близок к 1660 и 1680 млн лет, что несколько древнее основной фазы гранитов рапакиви (1650–1550 млн лет) и совпадает с предрифейской эпохой выветривания, в конце которой произошло формирование крупнейших месторождений “типа несогласия”. Образование вторичных кварцитов о. Б. Тюттерс, так же как и большинство классических проявлений подобного типа, мы связываем с флюидно-эксплозивной деятельностью вулканов предшествующих гранитам рапакиви, продукты которых в виде лав основного и кислого состава сохранились в раннерифейской толще расположенной на о. Голланд.

**Ключевые слова:** Финский залив, о. Большой Тюттерс, вторичные кварциты, железоглиноземистые метасоматиты, граниты, вулканиты, сланцы, сброс

## NATURE SECONDARY QUARTZITES OF THE ISLAND BOL'SHOY TYUTERS (GULF OF THE FINLAND, RUSSIA)

Evgenii N. Terekhov<sup>1</sup>, Aleksandr B. Makeev<sup>2</sup>, Vsevolod Yu. Prokofiev<sup>2</sup>, Tamara F. Shcherbakova<sup>1</sup>,  
Aleksandr S. Baluev<sup>1</sup>, Boris V. Ermolaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7 Pyzhevsky, Moscow, 119017, Russia, e-mail: tereh@ilran.ru

<sup>2</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetny, Moscow, 119017, Russia, e-mail: abmakeev@igem.ru

Received 12.12.2016; accepted 03.03.2017

Territory Baltic shield is well understood and the identification of innovative geological formations rare stroke of luck. Thanks to the Russian Geographical Society in the summer of 2015 an integrated expedition to study the nature of the little-known islands of the Outer Gulf of Finland was carried out and found, much quartz rocks ( $\text{SiO}_2$  more than 90%) that compose most part of the island Bolshoy Tyuters. As a result of complex studies including petrogeochemical, microprobe, isotope, thermobarogeochemical investigations and chromatographic analysis of gases, it can be asserted that these rocks are secondary quartzites formed under the influence of carbon dioxide solutions. The presence of shadow structures of migmatites, as well as mineralogical features of quartzites, suggest that the initial rocks, on which secondary quartzites were formed, could be shales of the svecofennian complex. The temperature of homogenization of gas-liquid inclusions is 330–370°C, which indicates a high-temperature facies of secondary quartzites. The age of the dikes of the granite composition, which break through secondary quartzites, is close to 1660 and 1680 million years, which is somewhat older

**Для цитирования:** Терехов Е.Н., Макеев А.Б., Прокофьев В.Ю., Щербакова Т.Ф., Балувев А.С., Ермолаев Б.В. (2017) Природа вторичных кварцитов острова Большой Тюттерс (Финский залив, Россия). *Литосфера*, 17(6), 62–80. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-6-062-080

**For citation:** Terekhov E.N., Makeev A.B., Prokofiev V.Yu., Shcherbakova T.F., Baluev A.S., Ermolaev B.V. (2017) Nature secondary quartzites of the island Bol'shoj Tyuters (Gulf of the Finland, Russia). *Litosfera*, 17(6), 62–80. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-6-062-080

than the main phase of rapakivi granites (1650–1550 my) and coincides with the pre-Riphean weathering era, at the end of which the formation of the largest “type of disagreement” occurred. The formation of secondary quartzites of B. Tyuters, as well as for most classical manifestations of this type, we associate with the fluid-explosive activity of volcanoes preceded of rapakivi granites, whose products, in the form of basic and acidic lavas, were preserved as part of the Early Riphean strata located on the island Hogland. Considering the huge resources of these quartzites (more than 370 million tons), this manifestation is very promising for high purity quartz raw materials, close to the North-Western industrial area and St-Petersburg. The formation of a subhorizontal plane controlling the formation of a deposit of secondary quartzites and Early Riphean sediments and rapakivi granite intrusions, we associate with the tectonic activity of the marginal part of the Baltic Shield, known as the Polkanov lineament.

**Keywords:** *Gulf of Finland, Bol'shoi Tyuters, secondary quartzite, iron-alumina metasomatic rocks, granites, volcanic rocks, schist, fault*

#### Acknowledgements

The authors express deep gratitude to the analysts S.N. Shanina and E.V. Kovalchuk; Russian Geographical Society for the organization of a complex expedition to B. Tyuters; as well as to the general sponsor – the public joint stock company “Federal Grid Company of the Unified Energy System” for their assistance in carrying out the RGS expedition season 2015.

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 14-05-00149. The research was carried out within the framework of the theme of the state tasks of the GIN RAS No. 0135-2016-0012 and the program No. 10 of the RAS.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной проблемой является острый дефицит высококачественного кварцевого сырья [Быдтаева и др., 2006]. Одним из его важных источников выступают метасоматические породы – вторичные кварциты, образующиеся в процессах кислотного выщелачивания в областях активного вулканизма. Территория Балтийского щита считалась малоперспективной на поиски подобных образований [Наковник, 1968]. Благодаря Русскому географическому обществу летом 2015 г. была осуществлена комплексная экспедиция по исследованию природы малоизученных Внешних островов Финского залива. В ходе экспедиции впервые для этого региона были обнаружены существенно кварцевые породы, которые составляют большую часть о. Большой Тютерс. Данная находка не только открывает новые перспективы по добыче этого вида дефицитного сырья, но и требует пересмотра некоторых представлений о характере формирования раннерифейских структур в южном обрамлении Балтийского щита и особенности их вещественного заполнения.

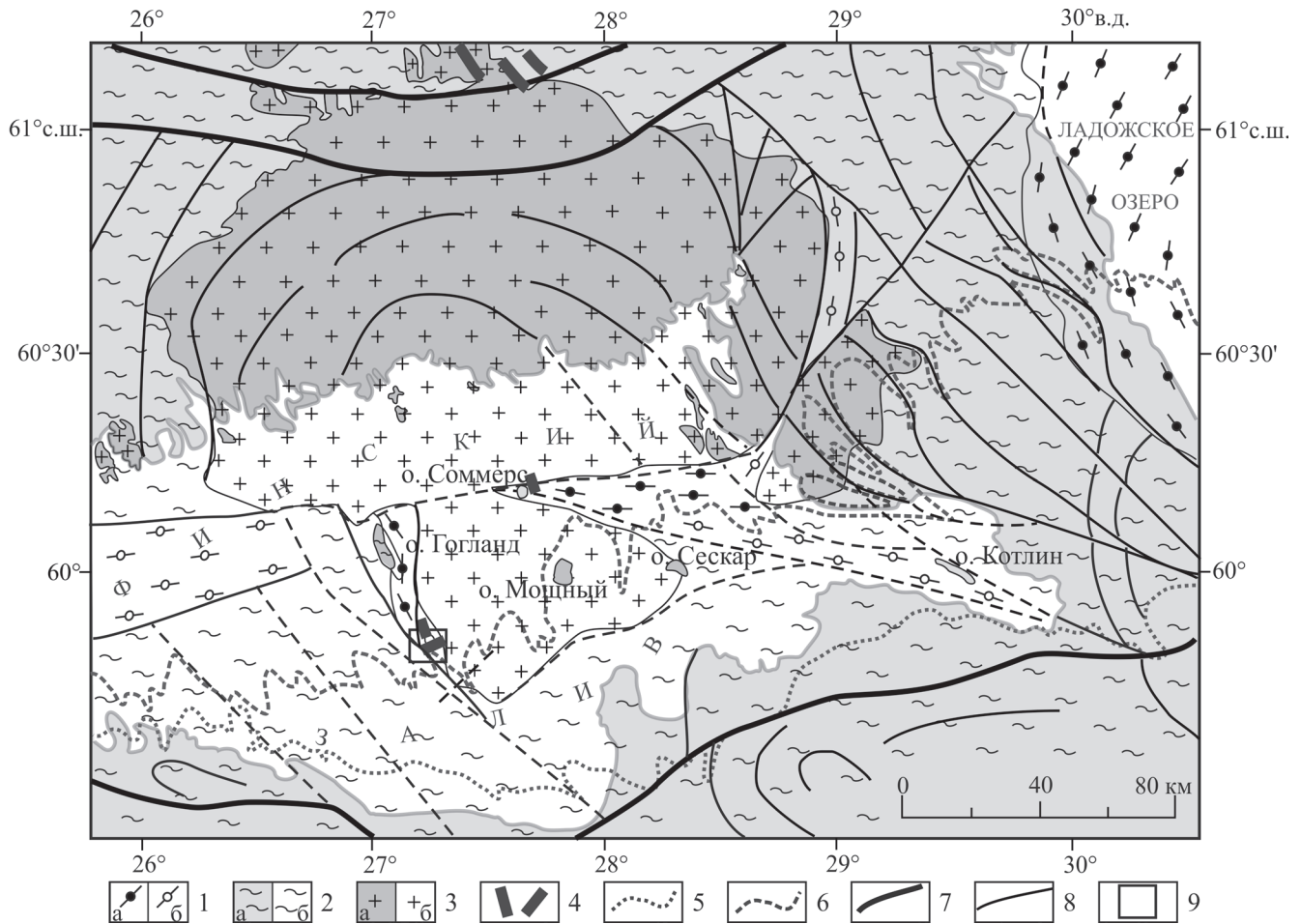
## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Остров Большой Тютерс расположен в центральной части Финского залива на расстоянии 25 км к югу от более известного о. Гогланд (рис. 1). Большая часть коренных пород о. Б. Тютерс представлена массивными, неполосчатыми кварцитами (рис. 2, 3а). Они имеют разную окраску – от бесцветной до серой и бурой с постепенными переходами. Это крупнозернистые, часто “сливные”, но местами пористые разности с содержанием SiO<sub>2</sub> более 95 мас. % (табл. 1). На старом скеле в них видны теневые структуры в виде разноцветных полос,

иногда мигматитового типа с характерными складками, но на свежем скеле никаких различий не наблюдается и все породы одинаково сложены кварцем. Кварциты не образуют пластов, складок, не выявлено осадочной полосчатости. Они занимают всю обнаженную часть острова и развиты как на берегу, так и в его водораздельной части, вертикальной и горизонтальной зональности не отмечено. Их видимая мощность, если считать, что они распространены в виде чехла, не менее 20–30 м. Кварциты секутся вертикальными и реже наклонными жилами кварцевого состава мощностью 10–40 см (см. рис. 3б). Жилы имеют характерную трещиноватость и разную ориентировку. Кварц в них сливной, полупрозрачный, и его зерна крупнее, чем в кварцитах.

В кварцитах выделяются наложенные линейные зоны трещиноватости. Их центральные части сложены массивными, более тяжелыми породами, имеющими ярко-бурю окраску (см. рис. 3в). Мощность этих зон до первых метров, они прослежены на сотни метров. В СЗ части острова они имеют СЗ или СВ простирание, а в южной части западного берега – субширотное. Зоны трещиноватости хорошо дешифрируются на космических снимках. В районе обнажений 11, 22 и 38 простирание этих наложенных зон совпадает с ориентировкой песчаной гряды в центральной части острова (см. рис. 2).

Большое значение для понимания природы кварцитов имеют дайки кислого состава, которые их прорывают. По составу и ориентировке на о. Б. Тютерс выделены два типа даек (табл. 2). Первый тип – это четыре дайки субширотного простирания мощностью от 50 см до 20 м в западной части острова (точки 10, 11, 22 и 23). В дайках видна флюидальность, параллельная контактам. В районе северного крыла крупной дайки (т. 23) присут-



**Рис. 1.** Структурно-геологическое положение о. Большой Тютерс.

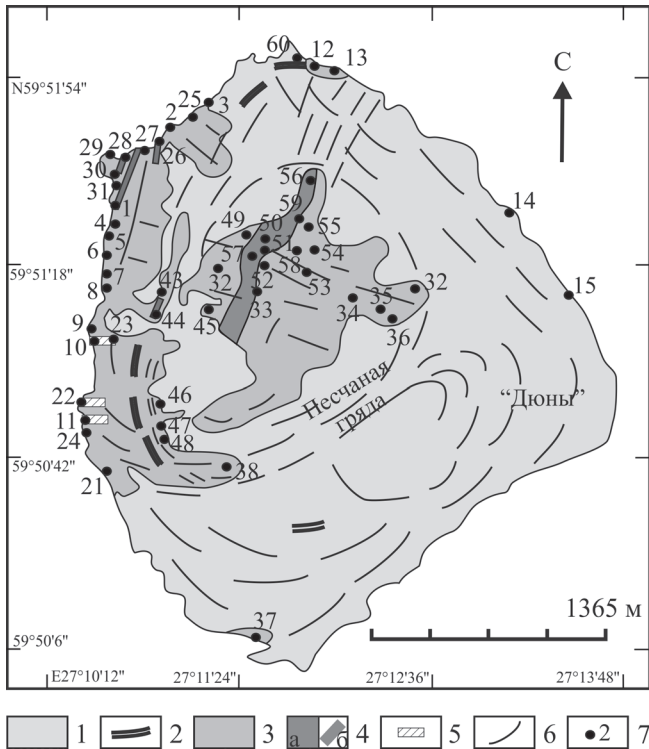
1 – рифейские отложения: а – достоверные, б – предполагаемые; 2 – свекофеннский комплекс: сланцы, мигматиты, амфиболиты (1950–1850 млн лет) – фундамент для рифейских образований: а – на суше, б – в акватории Финского залива; 3 – граниты рапакиви Выборгского массива (1650 млн лет): а – на суше, б – в акватории Финского залива; 4 – дайковые комплексы в обрамлении Выборгского массива; 5 – подошва палеозойских отложений Русской плиты; 6 – подошва вендских отложений; 7 – краевые ограничения линейamentной зоны Полканова; 8 – разломы и структурные элементы, дешифрируемые на космических снимках; 9 – местоположение о. Б. Тютерс.

**Fig. 1.** Structural-geological setting of the island Bol'shoi Tyuters.

1 – Riphean deposits: a – reliable, б – supposed; 2 – Svecofennian complex: schists, migmatites, amphibolites (1950–1850 Ma) – the foundation for the Riphean formations: a – on land, б – in the Gulf of Finland; 3 – Vyborg massif of the granites rapakivi (1650 Ma): a – on land, б – in the Gulf of Finland; 4 – dike complexes framed Vyborg massif; 5 – sole of Paleozoic sediments of the Russian plate; 6 – sole of Vendian deposits; 7 – boundary restrictions of Polkanova lineament zone; 8 – faults and structural elements from satellite images; 9 – location of B. Tyuters isl.

ствуют ксенолиты кварцитов, вытянутые по ее простиранию (см. рис. 3г). Южное крыло дайки тектонизировано. Вблизи берега, где отобраны пробы БТ-10, БТ-11 и БТ-23/1, породы флюидалные, но вверх по склону (на расстоянии 150 м и в высоту на 10–15 м) они становятся массивными и появляется субгоризонтальная отдельность (пр. БТ-23/2). Дайки второго типа, сложенные массивными крупнозернистыми гранитами, встречаются в СЗ части острова (обн. 28, 30, 31 и 36), их мощность от 1 до 15 м. Простирания даек с севера на юг. В одной из даек имеется изогнутое пегматитовое тело ши-

риной 1.0–1.5 м и длиной более 15.0 м с крупными обособлениями биотита (аннита). В другой дайке (т. 31), в ее западном крыле, встречен крупный ксенолит неокварцованных сланцев (см. табл. 1) с горизонтом амфиболитов и редкими жилками неомомы. Они идентичны супракрустальным породам свекофеннского комплекса. Вероятно, что подобные разности подстилают изученные кварциты, которые могли формироваться по ним. Крупнозернистые граниты слагают и небольшой, вытянутый с севера на юг, массив в центральной части острова (на нем расположен маяк).



**Рис. 2.** Геологическая карта о. Б. Тютерс.

1 – четвертичные отложения, пески, реже морена; 2 – древний пляж; 3 – вторичные кварциты; 4 – крупнозернистые граниты (1660 млн лет): а – массив, б – дайки; 5 – дайки преимущественно флюидальных гранитов (1680 млн лет); 6 – структурные элементы, дешифрируемые на космических снимках; 7 – точки наблюдения и опробования и их номера.

**Fig. 2.** Geological map of the island Bol'shoi Tyuters.

1 – quaternary sediments, sand, rarely moraine; 2 – the ancient beach; 3 – secondary quartzites; 4 – the coarse-grained Granites (1660 Ma): a – massif, б – dyke; 5 – dykes of predominantly fluidal granites (1680 Ma); 6 – structural elements from satellite imagery; 7 – point of observation and sampling and their number.

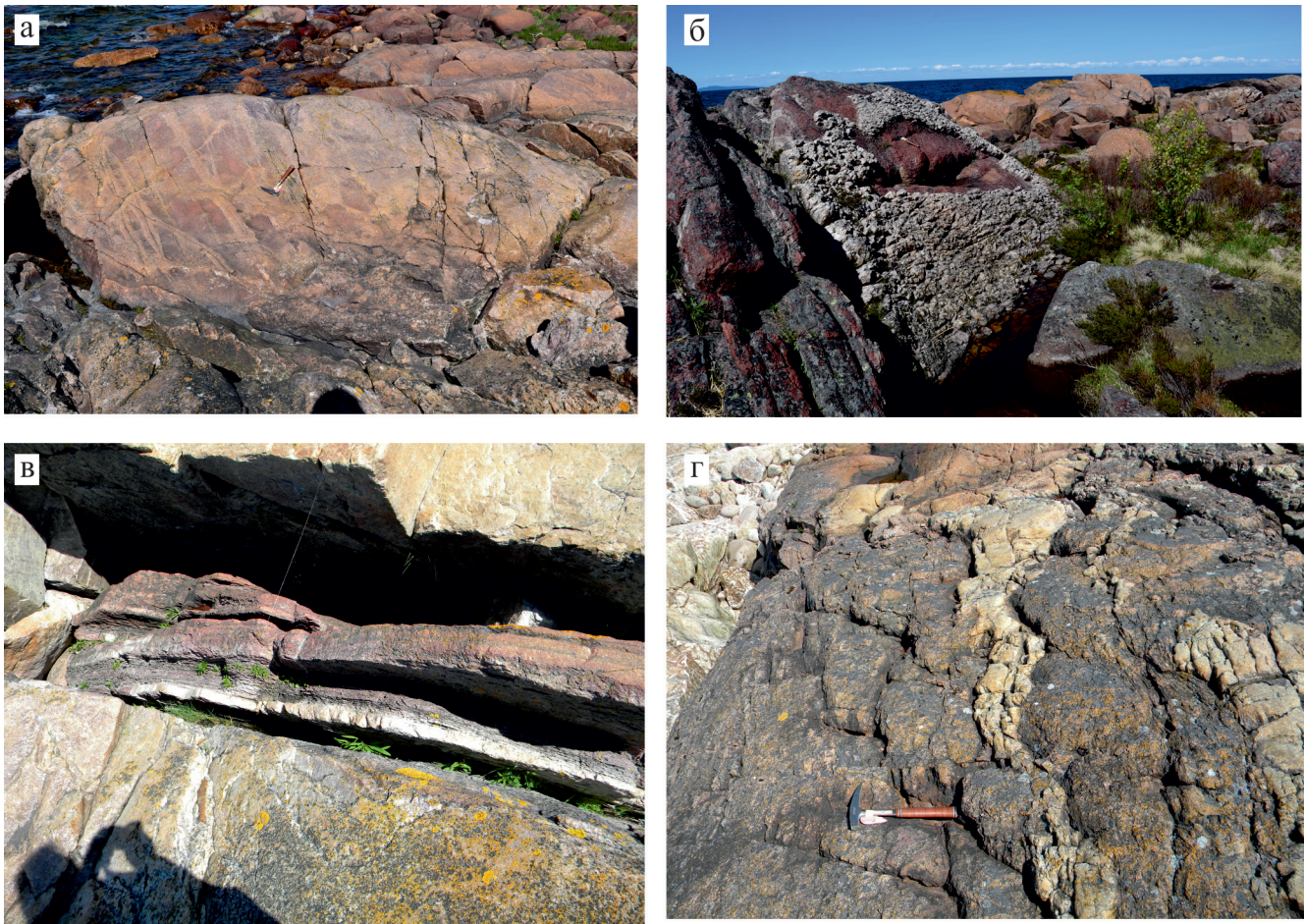
В лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН проведены определения К-Аг возраста гранитных даек (табл. 3). С некоторой долей условности можно говорить, что дайки широтного направления более древние, чем меридиональные. Очевидно, что по возрасту они близки гранитам рапакиви Выборгского массива – 1.62–1.65 млрд лет [Rämö, 1991; Laitakari et al., 1996]. Гранитные дайки прорывают уже сформировавшиеся кварциты, тем самым определяя их верхний возрастной рубеж образования – 1.68 млрд лет.

К югу от острова на геологических картах показано поле распространения вендских отложений. Острова, расположенные в этом поле (Мощный, Сескар, Котлин) (см. рис. 1), не имеют коренных обнажений, а покрыты песчаными отложения-

ми – дюнами, которые, вероятно, были образованы за счет размыва вендских песчаников. Дюны находятся и в восточной части о. Б. Тютерс. Возможно, что и здесь присутствуют вендские образования.

Расположение о. Б. Тютерс в центральной части Финского залива обуславливает трудность в интерпретации его структурного положения, к тому же строение морского дна остается во многом не ясным. Согласно геологической карте [Precambrian..., 1994], вся акватория залива сложена комплексом свекофеннид Южной Финляндии. Однако в объяснительной записке к этой карте [Laitakari et al., 1996] указано, что на островах Гогланд и Соммерс развиты раннерифейские образования, которые отложились до формирования гранитов рапакиви Выборгского массива. В более ранней работе [Валеев, 1978] вся глубинная составляющая западной части Финского залива, вплоть до о. Гогланд представлена рифейским рифтом. Он продолжается и к востоку от о. Соммерс, как показано на карте [Государственная..., 2000]. Таким образом, в районе островов Гогланд–Тютерс намечается промежуток, или прерывание рифейского грабена (см. рис. 1), т. е., возможно, что эта перемычка, разделяющая рифейские грабены, играла в свое время роль зоны аккомодации. В настоящее время западный берег о. Б. Тютерс испытывает воздымание (скалы), а восточный – погружение (прибрежные болота). Можно предполагать, что западнее о. Б. Тютерс существует меридиональный разлом взбросового типа. Расчлененный рельеф о. Гогланд с высотами до 200 м указывает на то, что его можно рассматривать как современную перемычку между прогибами. Учитывая, что большинство современных перемычек в той или иной степени наследуют древние, в частности рифейские, зоны аккомодации, это является дополнительным аргументом в пользу того, что район островов Гогланд–Б. Тютерс был зоной аккомодации и в рифейское время. Соответственно, многие особенности геологического строения этого района следует рассматривать с позиций формирования рифтогенных структур. Это значит, что к зонам аккомодации может быть приурочено максимальное количество даек и участков флюидной переработки [Балуев и др., 2009].

Ближайшим к о. Б. Тютерс изученным объектом является о. Гогланд, где выделены раннерифейские отложения хогландской серии. В ее составе помимо кварцевых конгломератов и песчаников присутствуют основные и кислые вулканиты, не характерные для других разрезов рифея этого региона [Богданов и др., 1999]. Породы хогландской серии несогласно залегают на сланцах и амфиболитах, сопоставляемых со свекофеннидами Финляндии. Породы этой серии полого погружаются к востоку под углами 5–20°. В основании разреза располагается горизонт кварцитовых конгломератов мощностью до 1 м, на котором с размывом залегают конгломе-



**Рис. 3.** Фотографии обнажений характерных разностей горных пород на о. Б. Тютерс.

а – вторичные кварциты, видны тенивые структуры исходных пород, предположительно сланцев; б – кварцевая жила среди вторичных кварцитов; в – зона железисто-глиноземистых метасоматитов; г – фрагмент гранитной жилы с ксенолитами вторичных кварцитов.

**Fig. 3.** Foto of outcrops characteristic differences of rocks in the island Bol'shoi Tyuters.

а – secondary quartzites, visible shadow structure of source rocks, presumably schists; б – quartz vein among secondary quartzites; в – zone of ferruginous-aluminous metasomatites; г – fragment of granite vein with xenoliths of the secondary quartzites.

раты второй пачки мощностью более 4.5 м с обломками серых, красноцветных и фиолетовых кварцитов. Выше по разрезу конгломераты сменяются кварцито-песчаниками, а далее – пачкой основных эффузивов мощностью до 35 м. Основные вулканы подстилаются маломощным (до 3.5 м) и перекрываются мощным (не менее 140 м) покровами кварцевых порфиров. Возраст кислых вулкаников, которые иногда рассматриваются как комагматы рапакиви Выборгского массива, определен в  $1640 \pm 11$  млн лет [Богданов и др., 1999]. Кислые вулканы встречаются на о. Соммерс (см. рис. 1), где они выступают частью структуры, вытянутой вдоль Финского залива и южной границы Балтийского щита, т. е. зоны Полканова. На о. Соммерс они лучше раскристаллизованы, чем на о. Гогланд,

и в них прослеживаются микрослои гематита. Дайка основного состава сечет кварцевые порфиры, а в северной части острова описаны граниты рапакиви, которые являются более поздними образованиями [Laitakari et al., 1996].

Таким образом, о. Большой Тютерс и крупное проявление кварцитов соответственно приурочены к широтной зоне линеамента Полканова – краевой части Балтийского щита. Совместно с о. Гогланд этот район можно рассматривать как зону accommodations, т. е. участка прерывания рифтовой системы рифейского возраста. Важно и то, что в начале рифейского времени здесь широко проявился вулканизм основного и кислого состава, который, вероятно, предшествовал формированию гранитов рапакиви.

**Таблица 1.** Химический состав, редкие элементы (мас. %, ppm), и нормативный минеральный состав (%) кварцитов, метасоматитов и сланца о. Б. Тютерс

**Table 1.** Chemical composition, trace elements (wt %, ppm), and normative mineral composition (%) of quartzites, metaso-  
 matites and schists of the island B. Tyuters

Компонент	Порода									
	Кварциты					Метасоматиты				Сланец
	Номер п/п									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Номер образца									
	БТ-2/1	БТ-5/1	БТ-8/1	БТ26/2	БТ26/3	БТ26/1	БТ-7/1	БТ-8/2	БТ27/1	БТ-31/1
SiO <sub>2</sub>	90.49	93.91	96.06	94.02	94.73	66.86	80.29	60.73	75.11	63.33
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.07	0.04	0.19	0.09	0.80	0.28	0.67	0.49	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.24	3.05	1.41	2.18	2.70	20.48	12.57	23.51	16.05	16.50
FeO	1.50	2.37	1.88	2.92	1.61	1.39	0.90	1.10	0.56	6.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.03	0.01	0.01	0.01	0.04	5.12	2.43	6.77	3.06	0.01
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08
MgO	0.08	0.08	0.08	0.06	0.05	0.23	0.10	0.11	0.11	2.11
CaO	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.09	0.07	0.08	0.06	2.21
K <sub>2</sub> O	0.07	0.10	0.03	0.19	0.27	0.27	0.20	0.35	0.50	3.42
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.02	0	0.12	0.11	0.33	0.11	0.36	0.16	3.67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.07
П.п.п.	1.01	0.20	0.28	0.12	0.12	4.22	2.89	6.16	3.81	0.73
Сумма	99.83	99.90	99.89	99.90	99.82	99.85	99.90	99.89	99.95	99.78
Sc	5.7	<2.0	<2.0	1.7	2.1	15.0	10.0	21.0	<2.0	13.0
V	11.0	3.5	2.6	8.9	<2.5	37.0	26.0	86.0	21.0	77.0
Cr	55.0	78.0	69.0	95.0	53.0	65.0	52.0	98.0	44.0	103.0
Co	3.4	3.2	4.0	3.5	2.8	15.0	3.9	6.4	4.0	15.0
Ni	17.0	14.0	13.0	16.0	12.0	48.0	16.0	29.0	24.0	41.0
Cu	19.0	22.0	18.0	20.0	16.0	11.0	14.0	23.0	13.0	19.0
Zn	7.2	4.1	2.9	3.6	2.7	66.0	20.0	66.0	21.0	110.0
Ga	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	16.0	4.9	22.0	9.0	21.0
As	2.4	1.2	2.6	4.4	4.2	4.0	5.2	5.2	3.4	4.4
Rb	7.6	5.5	3.0	12.0	15.0	16.0	18.0	31.0	28.0	273.0
Sr	15.0	18.0	13.0	15.0	15.0	23.0	89.0	38.0	16.0	204.0
Y	19.0	8.6	8.0	8.5	7.1	32.0	21.0	24.0	29.0	31.0
Zr	117.0	50.0	38.0	55.0	34.0	199.0	87.0	178.0	146.0	151.0
Nb	6.4	3.3	3.0	6.3	3.7	13.0	7.2	15.0	12.0	25.0
Mo	3.6	3.7	<2.0	5.0	5.2	<2.0	3.8	2.6	2.1	<2.0
Th	7.8	3.3	1.2	4.8	2.0	16.0	8.8	16.0	16.0	12.0
U	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	2.4	<2.0	5.2	2.3	5.2
Pb	3.9	86.0	3.2	4.6	4.4	8.7	5.5	6.9	6.2	22
Ba	<20.0	<20.0	<20.0	<20.0	23.0	34.0	27.0	49.0	<20.0	610.0
Кварц	83.89	89.67	94.36	90.92	90.99	41.79	64.49	31.77	55.06	22.00
Мусковит	0.70	1.00	0.30	1.90	2.70	2.70	2.00	3.50	5.00	24.20
Каолинит	12.21	6.48	3.27	2.07	2.83	44.04	28.10	50.50	33.52	10.00
Парагонит	0.31	0.31	0.00	1.86	1.71	5.12	1.71	5.58	2.48	31.40*
Ставролит	0.11	0.12	0.15	0.19	0.11	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	5.60**
Силлиманит	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.20	0.15	0.32	0.17	Ед. зн.
Гематит	0.32	1.78	1.56	1.34	0.84	3.00	2.00	5.18	2.00	4.00
Ti-магнетит	2.45	0.64	0.36	1.73	0.82	3.15	2.55	3.15	1.77	3.54
Циркон	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.016	0.004	0.003	0.003
Монацит	0.008	0.003	0.001	0.005	0.002	0.016	0.009	0.016	0.016	0.012

\*В сланце диагностирован альбит. \*\*В сланце диагностирован хлорит.

\*In the schist diagnosed albite. \*\*In the schist is diagnosed chlorite.

**Таблица 2.** Химический состав, редкие элементы (мас. %, ppm), и нормативный минеральный состав (%) гранитных даек о. Б. Тютерс**Table 2.** Chemical composition, trace elements (wt %, ppm), and normative mineral composition (%) of granite dykes of the island B. Tjuters

Компонент	Номер п/п								Средн. Выборг
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Номер образца								
	БТ-4	БТ-10/1	БТ-11	БТ-23/1	БТ-23/2	БТ-28	БТ-40	БТ-44/1	
SiO <sub>2</sub>	73.42	73.77	71.34	73.40	74.22	71.30	70.84	74.04	72.00
TiO <sub>2</sub>	0.22	0.19	0.33	0.18	0.14	0.29	0.13	0.15	0.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.95	13.72	14.62	14.13	13.86	14.1	14.98	12.88	12.40
FeO	1.76	1.91	2.53	1.82	1.56	1.86	1.78	2.80	1.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.67	0.41	0.24	0.32	0.60	0.52	0.28	0.01	1.70
MnO	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05
MgO	0.65	0.54	0.76	0.56	0.43	0.43	0.41	0.42	0.26
CaO	0.47	0.37	0.29	0.43	0.24	0.28	0.35	0.40	1.36
K <sub>2</sub> O	5.12	5.76	5.60	5.73	4.92	7.64	7.66	6.25	5.52
Na <sub>2</sub> O	2.25	2.09	2.57	2.19	3.10	2.31	2.07	2.25	2.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.10	0.09	0.10	0.12	0.10	0.13	0.10	0.05
П.п.п.	1.19	0.90	1.30	0.90	0.60	0.92	1.15	0.64	1.70
Сумма	99.80	99.79	99.72	99.79	99.82	99.79	99.79	99.96	99.96
Sc	3.4	3.8	6.6	7.1	4.0	4.6	2.3	2.5	6.3
V	6.9	5.6	16.0	7.2	8.1	8.7	3.3	9.3	–
Cr	50.0	45.0	27.0	39.0	45.0	16.0	18.0	69.0	–
Co	3.3	4.6	4.7	3.1	3.1	4.4	3.1	3.3	–
Ni	13.0	10.0	13.0	11.0	11.0	10.0	12.0	15.0	–
Cu	27.0	14.0	24.0	18.0	43.0	15.0	11.0	20.0	–
Zn	40.0	46.0	52.0	35.0	32.0	45.0	31.0	31.0	–
Ga	12.0	12.0	10.0	12.0	11.0	12.0	14.0	8.6	23.0
As	3.0	7.0	16.0	5.8	2.4	14.0	1.6	4.3	–
Rb	213.0	236.0	218.0	237.0	255.0	270.0	300.0	269.0	328.0
Sr	132.0	68.0	147.0	72.0	77.0	81.0	83.0	94.0	83.0
Y	27.0	24.0	17.0	23.0	28.0	16.0	23.0	18.0	105.0
Zr	129.0	90.0	193.0	87.0	81.0	236.0	65.0	75.0	476.0
Nb	13.0	17.0	18.0	15.0	16.0	11.0	23.0	12.0	45.0
Mo	<2.0	2.1	2.6	2.2	3.5	3.3	2.6	4.8	–
Th	23.0	20.0	45.0	17	21.0	55.0	13.0	15.0	12.0
U	5.3	11.0	7.4	6.4	44.0	4.8	6.6	5.1	5.2
Pb	57.0	47.0	46.0	43.0	34.0	38.0	50.0	58.0	22.0
Ba	248.0	202.0	400.0	196.0	171.0	619.0	243.0	256.0	723.0
Микроклин	20.21	26.09	22.35	25.59	22.87	40.99	41.21	33.98	27.39
Альбит	19.23	17.86	21.97	18.72	26.50	19.74	17.69	19.23	23.93
Мусковит	6.44	3.11	3.94	4.01	2.30	0.00	0.00	0.00	0.00
Кварц	41.49	42.44	37.09	40.81	40.15	28.92	33.06	38.36	34.97
Аннит	7.33	6.33	11.00	6.00	4.67	9.67	4.33	5.00	10.67
Хлорит	4.24	3.32	2.97	3.91	2.95	0.00	2.91	2.52	0.00
Апатит	1.04	0.82	0.64	0.96	0.53	0.62	0.78	0.89	3.02
Ксенотим	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005
Циркон	0.003	0.002	0.004	0.002	0.002	0.005	0.001	0.002	0.010
Монацит	0.023	0.020	0.045	0.017	0.021	0.055	0.013	0.015	0.015

Примечание. 1–5 – дайки широтного простирания; 6–8 – дайки меридионального простирания; Средн. Выборг – средний состав кварц-полевошпатовых даек Выборгского массива по [Rämö, 1991].

Note. 1–5 – dyke of the latitudinal stretch; 6–8 – dyke of the meridional stretch; Средн. Выборг – average composition of quartz-feldspar dykes Vyborg massif from [Rämö, 1991].

**Таблица 3.** Результаты определения К-Аг возраста гранитов о. Б. Тютерс

**Table 3.** Results of K-Ar age of the granites of the island B. Tyuters

№ обр.	Анализир. материал	Калий, % ± σ	Аг <sub>ради</sub> , нг/г ± σ	Аг <sub>атм</sub> , % (обр.)	Возраст, млн лет ± 2 σ
БТ-23/1	Биотит	386 ± 0.04	745 ± 2	4.4	1680 ± 30
БТ-40	Биотит	453 ± 0.05	856 ± 2	4.5	1660 ± 30

Примечание. Содержание радиогенного аргона определяли на масс-спектрометре МИ-1201 ИГ методом изотопного разбавления с применением в качестве трассера <sup>38</sup>Аг; калия – методом пламенной спектофотометрии. При расчете возраста использовали константы: λ<sub>к</sub> = 0.581·10<sup>-10</sup> год<sup>-1</sup>, λ<sub>р</sub> = 4.962·10<sup>-10</sup> год<sup>-1</sup>, <sup>40</sup>К = 0.01167 (ат. %).

Note. Determination of radiogenic argon conducted mass-spectrometer MI-1201 isotopic dilution method with application as trassera <sup>38</sup>Ar; determination of potassium – by spektofotometrii flame method. When calculating the age used constants: λ<sub>к</sub> = 0.116·10<sup>-10</sup> year<sup>-1</sup>, λ<sub>р</sub> = 4.962·10<sup>-10</sup> year<sup>-1</sup>, <sup>40</sup>К = 0.01167 (at. %).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Главные и малые химические элементы определяли в химико-аналитической лаборатории ГИН РАН на рентгеновском спектрометре S4 PIONEER фирмы Bruker AXS (ФРГ). Породообразующие и аксессуарные минералы кварцитов и ассоциирующих с ними пород о. Б. Тютерс предварительно диагностировали в петрографических шлифах, а затем с помощью волнового микронзонда JEOL-8200 в ИГЕМ РАН (оператор Е.В. Ковальчук) устанавливали их химический состав. Изучены 5 образцов (2 кварцита, 2 метасоматита, 1 гранит), проведены 57 количественных анализов и получено несколько десятков энергодисперсионных спектров для качественной диагностики минералов.

Микротермометрические исследования флюидных включений проводили в лаборатории геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы Linkam (Англия), микроскопа Olimpus B51 с набором длиннофокусных объективов, видеокамеры и управляющего компьютера. Это позволяет в режиме реального времени измерять температуру фазовых переходов внутри включений в интервале от -196 до +600°C, наблюдать за ними при больших увеличениях и получать микрофотографии.

Солевой состав растворов определяли по температурам эвтектик [Борисенко, 1977]. Концентрацию солей в растворе включений оценивали по температурам плавления газогидратов [Collins, 1979]. Концентрацию углекислоты и метана в растворе анализировали также из объемных соотношений фаз и плотностей углекислоты и метана в газовой фазе [Прокофьев, Наумов, 1987]. Давление определяли для гетерогенного флюида по пересечению изохоры и изотермы. Концентрацию солей и давлений флюида оценивали с помощью программы FLINCOR [Brown, 1989]. Состав газов в исследуемых породах о. Б. Тютерс определяли в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН на газовой хроматографической установке (оператор С.Н. Шанина).

## ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

### Петрографическая характеристика

**Кварциты.** При изучении под микроскопом установлен средний состав кварцитов по 10 шлифам: кварц ≈90%, рудный (титаномagnetит) – до 3%, мусковит – 2–3%, плагиоклаз – единичные зерна.

*Кварц* присутствует в основном в виде крупных (5 × 3 мм) зерен, без кристаллографических очертаний, с неровными границами. Иногда намечается слабо выраженная ориентировка зерен. В отдельных зернах наблюдается волнистое погасание, что свидетельствует о деформациях и напряжениях в решетке минерала.

*Плагиоклаз* наблюдался в нескольких шлифах. Это единичные небольшие зерна неправильной формы. Они отличаются от кварца несколько более высоким рельефом.

*Мусковит* – характерный минерал кварцитов, он поздний, образует тонкие пластинки, форма которых обусловлена ограничениями зерен кварца, поскольку он развит по их границам. В отдельных шлифах присутствуют пучки из тонких лейстовидных пластинок мусковита размером до 2.0 × 0.5 мм или агрегаты тонких чешуек, представляющих собой серицит.

*Рудные минералы.* По морфологии и характеру распределения в породе выделяются три типа зерен рудного минерала, содержание которых варьирует в разных шлифах от единичных зерен до 3%. Наиболее распространены мелкие (0.05–0.20 мм) изометричные (каплевидные) выделения, в наиболее крупных из них просматриваются полигональные очертания гексагонов. Они включены в кварц, и, вероятно, это – magnetит. Зерна гематита (красный в отраженном свете) неправильной формы иногда образуют в сростании с каолинитом сноповидные пластинчатые агрегаты длиной до 2 мм. Рудные минералы, присутствующие в виде мелких округлых выделений (5–20 мкм), развиты по границам зерен кварца и трещинам. Микронзондом диагностированы циркон и монацит.

**Железоглиноземистые метасоматиты.** На начальных стадиях развития метасоматитов вмеща-



ющие их кварциты разбиты субпараллельными, изогнутыми, прерывистыми трещинами. При этом почти каждое (особенно крупное) зерно кварца расчленено тонкими трещинками, выполненными темным веществом, тонкие каемки которого нередко окружают и многие зерна кварца. Ряд крупных зерен кварца переполнен рудным минералом (магнетитом) размером от менее 0.1 мм до  $1.2 \times 0.5$  мм. Биотит, вероятно, кристаллизовался до появления рудного минерала. Количество его изогнутых и перемятых пластинок варьирует в разных шлифах от 1–2 до 40%. Рудный минерал преимущественно приурочен к биотиту, который почти полностью изменен и присутствует лишь в виде небольших реликтов среди агрегата вторичных минералов, представленных хлоритом, мусковитом, кварцем, гематитом, магнетитом и каолинитом, последний преобладает.

**Гранитные дайки** широтного простирания (частично флюидальные разности) – породы розоватого цвета с намечающейся директивной текстурой. Преобладающий размер зерен 2–3 мм, но есть зерна кварца до 5 мм. Идиоморфизм для зерен не характерен. Структура гипидиоморфнозернистая. Состав, об. %: кварц – 37–42, альбит – 18–27, микроклин – 20–26, аннит (биотит) – 10–16, мусковит – 2–6.

*Микроклин* образует таблицы без идиоморфизма, решетчатый. Часть зерен имеет тонкие прерывистые закономерно гаснущие полосы пертитов. Микроклин неравномерно пелитизирован, а в некоторых препаратах – очень интенсивно и от этого его зерна окрашены в бурый цвет. Часто по границе микроклиновых зерен наблюдаются узкие альбитовые каемки.

*Плагноклаз* (альбит) представлен зернами разнообразной формы с неровными ограничениями и узкими, удлинёнными до 2.5 мм призмами, без двойниковых структур. Интенсивно и неоднородно сосюритизирован с преобладанием серицита в ряде зерен среди сосюрита или небольшими выделениями мусковита. По сравнению с микроклином плагноклаз мельче и более изменен. Оба минерала иногда несут следы деформации, что выражается в неровном, пятнистом угасании зерен.

*Кварц*. Образует более крупные по сравнению с альбитом и микроклином зерна со спокойным угасанием, за исключением единичных кристаллов, которые гаснут облачно. Переполнены темными точками, которые, вероятно, являются газовой-жидкими включениями. Присутствуют и мелкие (менее 0.1 мм) округлые зерна кварца, включенные в плагноклаз и микроклин. Возможно, это другая генерация кварца, более ранняя. В граните (т. 23), где наблюдаются ксенолиты кварцитов (см. рис. 3г), существуют две разновидности кварца: мелкий, округлый, включенный в плагноклаз, микроклин или приуроченный к их контактам и крупный, раз-

мером до  $5 \times 6$  мм. Последний содержит включения неправильных зерен измененного плагноклаза, а также микроклина и аннита.

*Аннит* (биотит) наблюдается в виде небольших (0.3–0.6 мм) идиоморфных пластинок, табличек, реже – в виде более крупных (до 2 мм длинной) неровно огранных пластинок. Эта слюда распределена по породе равномерно. Цвет буровато-зеленый, очень густой до непрозрачности, плеохроизм в светло-коричневых тонах.

*Мусковит* – паркетовидные зерна с совершенной спайностью бледной окраски, заполняет промежутки между зернами других алюмосиликатов.

Гранитные дайки широтного простирания испытывали метаморфизм зеленосланцевой фации при постмагматическом или гидротермальном воздействии (альбитовые каймы, пертиты, сосюрит, хлорит). Дайки гранитов меридионального простирания отличаются от описанных выше большей сохранностью. В породе выше содержание микроклина за счет кварца и нет хлорита.

#### Геохимия кварцитов и ассоциируемых с ними пород

Содержание  $\text{SiO}_2$  в кварцитах более 90 мас. %. Первые доли процента приходятся на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , но обращает на себя внимание очень низкое содержание  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$  и почти полное отсутствие щелочей (см. табл. 1). Соответственно, отсутствуют и крупноионные литофилы (Ba, Rb, U, Th), но отмечается высокое содержание Zr (от 34 до 117 ppm) и Sr (от 55 до 69 ppm). Кварцевые жилы по цвету, размеру и по облику кварца заметно отличаются от вмещающих кварцитов, но по геохимическим признакам они не различимы.

Бурые породы (железоглиноземистые метасоматиты) из центральных частей зон трещиноватости в кварцитах имеют с ними постепенные переходы (от шпироподобных обособлений до “настоящих” жил) как по внешнему виду, так и по составу. Содержание  $\text{SiO}_2$  меняется от 90 до 60 мас. %, концентрация  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и особенно  $\text{Al}_2\text{O}_3$  увеличивается, достигая 23%, с появлением глиноземистых минералов. Обращает на себя внимание преобладание окисного железа над закисным, что характерно для вторичных кварцитов [Наковник, 1968], а концентрации  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и щелочей остаются на низком уровне. Содержание большинства микроэлементов в бурых породах резко возрастает, это касается Sc, V, Cr, Ni, Zn, Ga, Rb, Zr, Ba. При этом отмечается закономерное повышение концентрации глинозема и галлия, свидетельствующее об их геохимическом родстве.

Составы гранитных жил первой и второй групп принципиально не различаются. Исключением являются повышенное содержание  $\text{K}_2\text{O}$  и меньшее –  $\text{MgO}$  у второй группы (см. табл. 2).

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН в породообразующем кварце оценены предельные концентрации парамагнитных примесей и центров (Al, Ge, Ti и E<sub>1</sub>) [Лютоев и др., 2016]. Установлено, что по содержанию примесных центров в кварце – [AlO<sub>4</sub>]<sup>0</sup> (9–18), [GeO<sub>4</sub>/M+]<sup>0</sup> (0.16–0.37), [TiO<sub>4</sub>/R+]<sup>0</sup> (2–6 ppm) – они не сильно отличаются от референтных образцов кыштымского жильного кварца, поэтому кварциты могут вызывать промышленный интерес.

### Минералогия кварцитов и ассоциирующих пород

В кварцитах диагностированы кварц, мусковит, ставролит, каолинит, титаномагнетит, циркон, монацит, гематит; в железоглиноземистых метасоматитах – кварц, мусковит, парагонит, каолинит, силлиманит, гематит, титаномагнетит, циркон, монацит; в граните – кварц, калиевый полевой шпат (микроклин-пертит), альбит, мусковит, аннит (биотит), хлорит, апатит, монацит, ксенотим, рутил, Fe-рутил.

Наиболее информативным оказался химический состав слюд (табл. 4). Выявлены три минеральных вида слюд – железистый мусковит в кварцитах (рис. 4), такой же железистый мусковит KAl<sub>2.7</sub>[(Al<sub>0.3</sub>Fe<sub>0.2</sub>)Si<sub>3.5</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub> и парагонит NaAl<sub>2</sub>[AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub> в метасоматитах (рис. 5), а в гранитах присутствуют обычный безжелезистый мусковит KAl<sub>2</sub>[AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub> и аннит (биотит). Аннит – высокотитанистая, высокожелезистая слюда K(Mg<sub>0.6</sub>Fe<sub>1.6</sub>Al<sub>0.7</sub>)[Al<sub>1.1</sub>Si<sub>2.9</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub> – оказался очень неустойчивым в полнокристаллических порфировых гранитах о. Б. Тютерс (рис. 6). Он замещается хлоритом ряда прохлорита–тюрингита – Mg<sub>1.1</sub>Fe<sub>3.4</sub>Al<sub>1.5</sub>[Al<sub>1.3</sub>Si<sub>2.7</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>8</sub>, который наследует железисто-глиноземистый состав этой слюды. Высвобождающийся при метаморфизме из аннита титан образует мелкую пьлевидную вкрапленность собственных минералов – рутила и Fe-рутила.

Химический состав слюд, алюмосиликатов с постоянным составом представлен в табл. 5, эти данные, как и составы аксессуарных железотитановых минералов (табл. 6), легли в основу расчетов нормативного состава пород (см. табл. 1, 2). Оказалось, что кварциты и метасоматиты – близкие по фазовому минеральному составу породы (см. табл. 1) – сильно отличаются количественным их соотношением. В метасоматитах увеличено содержание всех минеральных фаз за счет уменьшения кварца. В обеих породах полностью совпадает состав аксессуарных рудных минералов, в частности титаномагнетита. Этот минерал, обычно характерный для основных магматических пород (габброидов, базальтов), возможно, под влиянием флюидов, связанных с вулканами, образовался в кварцитах и же-

лезоглиноземистых метасоматитах. В целом одинаковый минеральный фазовый состав этих пород может свидетельствовать об их едином протолите и источнике вещества (свекофенские сланцы и вулканические флюиды).

Минеральный состав даек кислого состава отвечает типичным гранитам Балтийского щита. Некоторое отличие минерального состава даек широтного и меридионального простираний проявилось в отсутствии мусковита и преобладании слюды аннита (биотита) в последних, а также увеличении содержания микроклина за счет уменьшения кварца. Кислые дайки широтного простирания в меньшей степени изменены, что сказалось на отсутствии хлоритизации железисто-титанистой слюды аннита. Состав аксессуарных минералов во всех дайках примерно одинаков.

### Результаты исследования флюидных включений

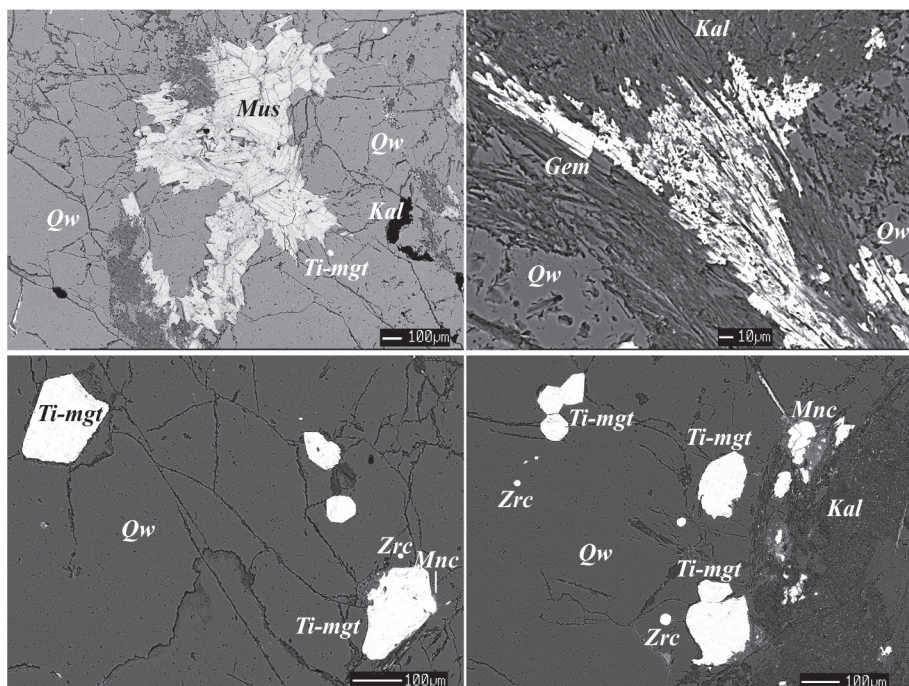
Изучены два образца кварцитов о. Б. Тютерс. В зернах кварца обнаружены флюидные включения размером более 10 мкм, пригодные для микротермометрических исследований. По фазовому составу при комнатной температуре первичные включения подразделены на три типа (рис. 7): 1) углекислотно-водные флюидные включения; 2) газовые флюидные включения, заполненные плотной углекислотой; 3) двухфазовые газожидкие включения разбавленных водных растворов. Среди изученных флюидных включений в соответствии с известными критериями [Реддер, 1987] выделены первичные, первично-вторичные и вторичные. К первичным отнесены включения, равномерно распределенные в объеме минерала-хозяина либо приуроченные к зонам роста. Вторичными считались включения, приуроченные к секущим трещинам минерала-хозяина. Первично-вторичные флюидные включения приурочены к трещинам, не достигающим внешних границ кристаллов и зерен, а по фазовому наполнению они аналогичны первичным.

Первичные флюидные включения типов 1 и 2 часто образуют ассоциации захваченных одновременно включений, что свидетельствует о наличии двухфазового равновесия. Температуры гомогенизации углекислотно-водных включений из таких ассоциаций соответствуют температурам захвата включений (и не требуют поправки на давление). Кроме того, ассоциации включений типов 1 и 2 позволяют оценить давление флюида. Все типы включений обнаружены в кварце из обр. БТ-26/2 (кварцевая жила). В обр. БТ-26/3 (кварцит) найдены только включения плотной углекислоты. Данные термометрического изучения 148 индивидуальных флюидных включений приведены в табл. 7. Температуры гомогенизации первичных флюид-

Таблица 4. Химический состав (мас. %), и коэффициенты катионов в формулах слюды и хлорита

Table 4. Chemical composition (wt %), and coefficients of the cations in formulas mica and chlorite

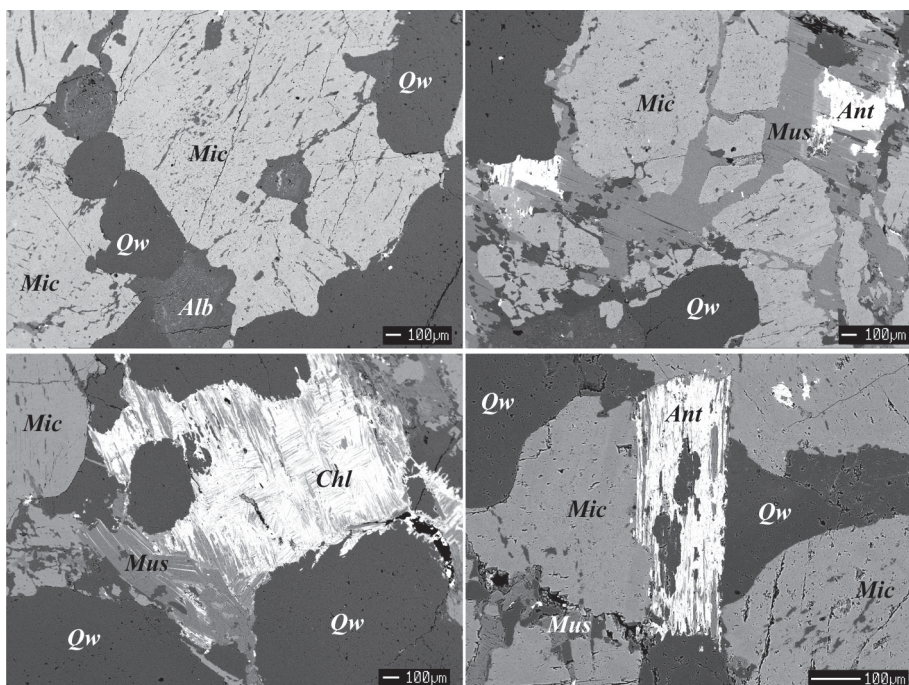
Компо- нент	Кварцит					Метасоматит								
	Проба													
	БТ-12/2		БТ-2/16			БТ-8/2				БТ-12/3				
	Номер п/п													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
SiO <sub>2</sub>	45.70	45.93	45.81	45.57	45.93	45.25	45.12	45.49	46.52	47.83	45.85	45.93	45.62	
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.21	0.39	0.39	0.36	0.91	0.63	0.80	0.15	0.38	0.31	0.26	0.21	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.00	34.74	34.22	34.20	34.57	32.34	34.59	33.45	38.79	37.95	34.13	33.92	34.51	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.00	0.15	0.03	0.06	0.00	0.00	0.07	0.39	0.00	0.03	0.01	0.04	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.94	2.88	3.36	3.36	2.98	3.82	3.06	3.37	0.74	0.80	3.44	3.48	3.27	
MnO	0.10	0.00	0.01	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.04	0.10	0.03	0.02	0.04	
MgO	0.13	0.23	0.58	0.52	0.56	0.21	0.16	0.00	0.35	0.32	0.60	0.59	0.61	
CaO	0.42	0.33	0.05	0.02	0.02	0.68	0.41	0.50	0.16	0.14	0.00	0.00	0.00	
Na <sub>2</sub> O	1.17	0.89	1.05	1.28	1.28	0.99	1.41	0.86	6.64	6.26	1.07	1.14	1.19	
K <sub>2</sub> O	10.06	9.81	9.38	9.54	9.20	10.72	9.42	10.37	1.03	1.22	9.51	9.58	9.45	
Cl	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.20	0.07	0.17	0.00	0.01	0.00	0.00	
Total	95.00	95.00	95.01	94.96	94.99	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00	94.98	94.94	94.95	
Компо- нент	Мусковит		Мусковит			Мусковит			Парагонит		Мусковит			
	Si <sup>4+</sup>	3.501	3.521	3.513	3.489	3.514	3.484	3.459	3.505	3.439	3.546	3.515	3.521	3.491
	Ti <sup>4+</sup>	0.024	0.012	0.022	0.023	0.021	0.053	0.036	0.046	0.008	0.021	0.018	0.015	0.012
	Al <sup>3+</sup>	3.070	3.139	3.093	3.086	3.117	2.934	3.125	3.038	3.380	3.316	3.084	3.065	3.113
	Cr <sup>3+</sup>	0.004	0.000	0.009	0.002	0.004	0.000	0.000	0.005	0.023	0.000	0.002	0.001	0.002
	Fe <sup>2+</sup>	0.188	0.185	0.216	0.215	0.191	0.246	0.196	0.217	0.046	0.049	0.221	0.223	0.209
	Mn <sup>2+</sup>	0.006	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003	0.006	0.002	0.001	0.003
	Mg <sup>2+</sup>	0.015	0.026	0.067	0.060	0.064	0.024	0.019	0.000	0.038	0.036	0.069	0.068	0.070
	Ca <sup>2+</sup>	0.035	0.027	0.004	0.002	0.002	0.056	0.034	0.041	0.013	0.011	0.000	0.000	0.000
	Na <sup>+</sup>	0.174	0.132	0.157	0.191	0.190	0.148	0.210	0.129	0.952	0.900	0.159	0.170	0.177
	K <sup>+</sup>	0.983	0.959	0.918	0.932	0.898	1.053	0.921	1.020	0.097	0.115	0.930	0.937	0.923
	Компо- нент	Гранит БТ-23/1												
			14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SiO <sub>2</sub>		45.92	45.79	45.64	47.85	46.04	34.67	33.27	24.96	23.38	25.05	23.68	23.79	23.87
TiO <sub>2</sub>		0.35	0.01	0.33	1.11	0.39	3.23	2.87	0.11	0.14	0.15	0.05	0.06	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		36.03	37.65	36.20	29.21	36.07	19.39	18.55	20.66	18.63	19.66	21.26	21.29	21.30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.03	0.43	0.04	0.01	0.02	0.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1.42	0.82	1.38	3.46	1.24	24.31	23.98	35.79	35.05	35.11	36.53	35.97	36.03
MnO		0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.40	0.35	0.37	0.24	0.35	0.56	0.65	0.68
MgO		0.55	0.14	0.56	2.49	0.54	5.26	5.10	6.78	6.55	7.34	5.79	5.89	5.70
CaO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00
Na <sub>2</sub> O		0.51	0.47	0.56	0.07	0.53	0.24	0.35	0.05	0.11	0.05	0.09	0.04	0.01
K <sub>2</sub> O		10.58	10.84	10.62	11.19	10.68	9.68	9.30	0.04	0.09	0.07	0.04	0.05	0.05
Cl		0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.16	0.20	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03
Total	95.44	95.73	95.32	95.39	95.52	97.38	94.73	88.94	84.71	87.97	88.06	87.77	87.84	
Компо- нент	Мусковит				Аннит				Хлорит					
	Si <sup>4+</sup>	3.494	3.462	3.471	3.676	3.496	2.736	2.704	2.749	2.730	2.786	2.656	2.668	2.679
	Ti <sup>4+</sup>	0.020	0.001	0.019	0.064	0.022	0.192	0.175	0.009	0.012	0.013	0.004	0.005	0.005
	Al <sup>3+</sup>	3.231	3.355	3.245	2.645	3.228	1.803	1.777	2.682	2.564	2.577	2.811	2.814	2.817
	Cr <sup>3+</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.003	0.040	0.004	0.001	0.002	0.002
	Fe <sup>2+</sup>	0.090	0.052	0.088	0.222	0.079	1.604	1.630	3.297	3.422	3.266	3.427	3.374	3.381
	Mn <sup>2+</sup>	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.027	0.024	0.035	0.024	0.033	0.053	0.062	0.065
	Mg <sup>2+</sup>	0.062	0.016	0.063	0.285	0.061	0.619	0.618	1.113	1.140	1.217	0.968	0.985	0.954
	Ca <sup>2+</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.005	0.005	0.001	0.001	0.000
	Na <sup>+</sup>	0.075	0.069	0.083	0.010	0.078	0.037	0.055	0.011	0.025	0.011	0.020	0.009	0.002
K <sup>+</sup>	1.027	1.046	1.030	1.097	1.035	0.974	0.964	0.006	0.013	0.010	0.006	0.007	0.007	



**Рис. 4.** Электронно-микроскопическое изображение (BSE) кварцита (обр. БТ-2/1). JEOL-8200 (ИГЕМ РАН).  
*Kal* – каолинит, *Mus* – мусковит, *Qw* – кварц, *Mon* – монацит, *Zrc* – циркон, *Gem* – гематит, *Ti-Mgt* – титаномагнетит.

**Fig. 4.** Electron microscopic image (BSE) of quartzite (sample BT-2/1). JEOL-8200 (IGEM RAS).

*Kal* – kaolinite, *Mus* – Muscovite, *Qw* – quartz, *Mon* – monazite, *Zrc* – zircon, *Gem* – hematite, *Ti-Mgt* – titano-magnetite.

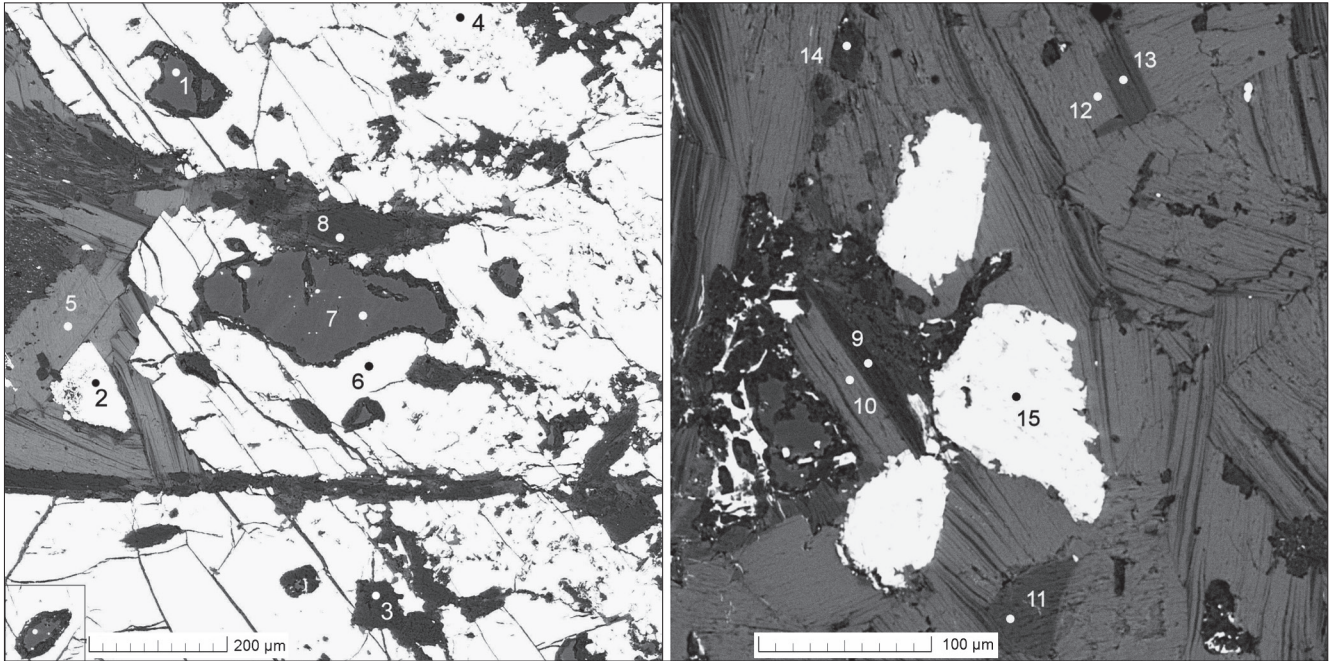


**Рис. 5.** Электронно-микроскопическое изображение (BSE) гранита (обр. БТ-23/1).

*Alb* – альбит, *Ant* – аннит, *Chl* – хлорит, *Mus* – мусковит, *Mic* – микроклин, *Qw* – кварц.

**Fig. 5.** Electron microscopic image (BSE) of granite (sample BT-23/1).

*Alb* – albite, *Ant* – annite, *Chl* – chlorite, *Mus* – muscovite, *Mic* – microcline, *Qw* – quartz.



**Рис. 6.** Электронно-микроскопические изображения (BSE) железо-глиноземистого метасоматита (обр. БТ-8/2).  
1, 7 – кварц; 2, 15 – Ti-магнетит; 4, 6 – гематит; 3, 8, 9, 14 – каолинит; 5, 10, 12 – мусковит; 11, 13 – парагонит.

**Fig. 6.** Electron-microscopic images (BSE) of alumina-iron metasomatic rocks (sample BT-8/2).

1, 7 – quartz; 2, 15 – Ti-magnetite; 4, 6 – hematite; 3, 8, 9, 14 – kaolinite; 5, 10, 12 – muscovite; 11, 13 – paragonit.

**Таблица 5.** Химический (микронзондовый) состав алюмосиликатов из пород о. Б. Тютерс, мас. %

**Table 5.** Chemical (mikrozondivyj) composition of aluminosilicates of rocks of the island B. Tyuters, wt %

№	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	Сумма	Минерал
27	51.61	Н. о.	41.16	0.33	0.00	0.09	0.03	0.65	0.14	0.00	0.00	94.02	Каолинит
28	35.02	1.11	55.77	6.25	0.00	0.04	0.00	0.40	0.20	0.20	0.00	99.01	Ставролит
29	51.01	0.13	41.04	1.34	Н. о.	0.02	0.17	Н. о.	0.01	0.17	0.10	94.02	Каолинит
30	50.87	Н. о.	40.98	1.40	Н. о.	0.23	0.25	0.24	0.02	0.01	Н. о.	94.12	—?—
31	51.18	Н. о.	41.33	0.42	0.15	0.17	0.02	0.17	0.47	Н. о.	0.08	94.01	—?—
32	49.39	Н. о.	41.39	2.22	Н. о.	0.19	0.08	0.39	Н. о.	0.26	0.07	94.03	—?—
33	47.69	Н. о.	39.74	0.83	0.03	0.11	0.07	0.05	0.04	Н. о.	0.01	94.00	—?—
34	48.64	0.01	36.83	1.25	Н. о.	0.11	0.10	0.11	0.09	Н. о.	0.04	93.98	—?—
35	37.03	Н. о.	58.00	0.84	Н. о.	0.02	0.01	0.50	0.48	Н. о.	0.00	96.94	Силлиманит
36	35.86	Н. о.	61.07	1.56	Н. о.	0.01	0.01	0.01	0.00	Н. о.	0.01	98.54	—?—
37	64.78	0.03	18.44	Н. о.	Н. о.	0.00	0.00	15.78	0.88	0.08	0.00	100.02	Микроклин
38	65.08	Н. о.	18.54	Н. о.	0.01	0.02	0.01	16.23	0.57	0.04	0.01	100.54	—?—
39	64.56	Н. о.	18.51	0.02	Н. о.	0.03	0.01	15.97	0.70	0.04	0.01	99.89	—?—
40	67.79	Н. о.	19.69	Н. о.	Н. о.	0.20	Н. о.	0.07	11.79	0.05	0.01	99.60	Альбит
41	68.09	0.01	19.70	0.01	Н. о.	0.16	Н. о.	0.10	11.84	0.02	0.01	99.94	—?—
42	67.55	0.00	20.00	0.03	Н. о.	0.79	0.01	0.14	11.47	0.02	Н. о.	100.04	—?—

Примечание. Анализы 27, 28 – обр. БТ-12/2 – кварцит; 29–32 – БТ-12/3; 33–36 – БТ-8/2 – железоглиноземистый метасоматит; 37–42 – БТ-23/1 – гранит.

Note. Tests 27, 28 – sp. BT-12/2 – quartzite; 29–32 – BT-12/3; 33–36 – BT-8/2 – iron-aluminous metasomatit; 37–42 – BT-23/1 – granite.

ных включений типа 1 в кварце изменяются в интервале от 327 до 363°C. Концентрация солей в растворе включений этого типа составляет 6.3–6.7 мас.

%-экв. NaCl. Концентрация углекислоты в минералообразующем флюиде 6.1–6.6 моль/кг раствора, а метана – 0.8 моль/кг. Плотность углекислотно-

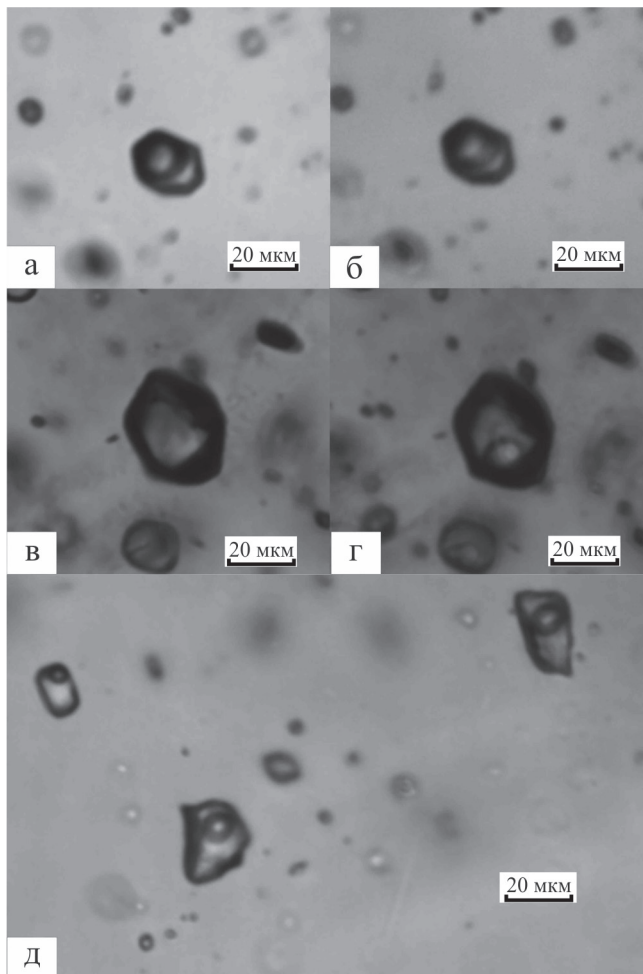
**Таблица 6.** Химический (микроволновый анализ) состав железотитановых акцессорных минералов из пород о. Б. Тютерс, мас. %

**Table 6.** Chemical (microwave analysis) composition Iron-Titanium accessory minerals from the rocks of the island B. Tyuters, wt %

№ обр.	№	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма	Минералы
БТ-2/1б	43	13.37	84.53	0.13	0.04	0.20	0.06	0.02	2.29	100.64	Тi-магнетит
	44	11.06	88.57	0.24	Н. о.	0.03	0.03	0.05	0.05	100.04	—”—
БТ-12/3	45	9.62	90.86	0.08	Н. о.	0.06	0.03	0.01	0.20	100.86	—”—
	46	9.11	91.11	0.18	Н. о.	0.10	0.08	0.04	0.10	100.72	—”—
	47	9.86	89.87	0.25	Н. о.	0.14	0.01	0.03	0.10	100.26	—”—
БТ-12/2	48	13.17	86.13	0.11	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.26	0.01	99.68	—”—
	49	12.38	86.35	0.44	Н. о.	Н. о.	0.20	0.09	0.34	99.80	—”—
БТ-8/2	50	14.24	84.11	0.32	Н. о.	Н. о.	0.32	0.55	0.31	99.87	—”—
	51	12.25	87.27	0.06	Н. о.	Н. о.	0.13	0.15	0.10	99.97	—”—
	52	0.12	99.01	0.01	Н. о.	Н. о.	0.18	0.11	0.22	99.65	Гематит
	53	0.06	99.01	0.00	Н. о.	Н. о.	0.29	0.06	0.05	99.48	—”—
БТ-2/1б	54	0.00	97.80	0.01	Н. о.	0.04	0.53	0.62	0.60	99.59	—”—
	55	0.04	97.76	0.00	Н. о.	0.13	0.12	0.45	0.22	98.71	—”—
БТ-23/1б	56	62.40	22.94	0.20	0.79	0.05	0.06	1.34	1.53	89.31	Fe-рутил
	57	94.75	1.49	0.04	1.46	0.01	0.02	0.32	0.12	98.20	Рутил

Примечание. БТ-2/1б, БТ-12/2 – кварцит; БТ-12/3, БТ-8/2 – железоглиноземистый метасоматит, БТ-23/1б – гранит.

Note. БТ-2/1b, БТ-12/2 – quartzite; БТ-12/3, БТ-8/2 – iron-aluminous metasomatit; БТ-23/1b – granite.



**Рис. 7.** Флюидные включения разных типов в кварце кварцитов о. Б. Тютерс.

а, б – углекисотно-водного типа 1 (а – +25°C, б – +10°C); в, г – газового типа 2 (в – +25°C, г – –5°C); д – двухфазовые газовой-жидкие водно-солевых растворов типа 3.

**Fig. 7.** Fluid inclusions of various types in quartz quartzite islands Bol'shoi Tyuters.

а, б – carbonic acid-water type 1 (а – +25°C, б – +10°C); в, г – gas type 2 (в – +25°C, г – –5°C); д – two-phase gas-liquid water-salt solutions of type 3.

водного флюида 0.97–0.98 г/см<sup>3</sup>. Судя по величине температуры эвтектики (от –30 до –32°C), во флюиде среди солей преобладали хлориды натрия, магния и железа.

Гомогенизация углекислоты во флюидных включениях типа 2, сингенетичных включениям 1 типа, из обр. БТ-26/2 происходит в жидкую фазу при температуре от 13.8 до 21.4°C. Плавление углекислоты наблюдается в интервале температур от –57.2 до –57.8°C, т. е. практически соответствует температуре плавления чистой углекислоты (–56.6°C). Плотность углекислотной фазы изменяется от 0.76 до 0.83 г/см<sup>3</sup>.

Температура гомогенизации углекислоты во флюидных включениях типа 2 из обр. БТ-26/3 почти такая же – 17.7–23.0°C. Плавление углекислоты происходит в интервале температур от –58.1 до –58.3°C, т. е. тоже близка температуре плавления чистой углекислоты (–56.6°C). Плотность углекислотной фазы изменяется от 0.74 до 0.80 г/см<sup>3</sup>.

**Таблица 7.** Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце из кварцитов о. Б. Тютерс**Table 7.** The results of thermo-and kriometrical studies of individual fluid inclusions in quartz from the quartzite the island B. Tyuters

№ образца	БТ-26/2				БТ-26/3
	1 П	2 П	3 П-В	3 В	2 П
Тип включений					
n	28	79	7	9	25
$T_{\text{гом}}$ , °	327–363	–	315	210	–
$T_{\text{эвт}}$ , °	–30...–32	–	–31	–26	–
$T_{\text{пл.льда}}$ , °	–5.8...–6.0	–	–1.4	–1.3	–
$T_{\text{пл.СО}_2}$ , °	–57.4	–57.2...–57.8	–	–	–58.1...–58.3
$T_{\text{гом.СО}_2}$ , °	23.1 Ж	13.8–21.4 Ж	–	–	17.7–23.0 Ж
$T_{\text{пл.газ}}$ , °	8.1–8.3	–	–	–	–
$C_{\text{солей}}$ , мас. % экв. NaCl	6.3–6.7	–	2.3	2.1	–
$C_{\text{СО}_2}$ , моль/кг раствора	6.1–6.6	–	–	–	–
$C_{\text{СН}_4}$ , моль/кг раствора	0.8	–	–	–	–
d, г/см <sup>3</sup>	0.97–0.98	0.76–0.83	0.69	0.87	0.74–0.80
Давление, бар	1520–2100				–

Примечание. 1 – углекислотно-водно-солевого типа 1; 2 – газового типа 2; 3 – двухфазовые водно-солевого типа 3. Генетический тип включений: П – первичные, П-В – первично-вторичные, В – вторичные. Г – гомогенизация углекислоты в газ, Ж – в жидкость, n – количество включений, d – плотность флюида.

Note. 1 – carbonic acid-water-salt-type 1; 2 – gas type 2; 3 – two-phase aqueous-salt type 3. Genetic type of inclusions: П – primary, П-В – primary-secondary, В – secondary. Г – homogenization of carbonic acid in the gas, Ж – to liquid, n – the number of inclusions, d – the density of the fluid.

Давление флюида, оцененное для ассоциаций флюидных включений типов 1 и 2 в кварце обр. БТ-26/2, захватывавшихся в периоды гетерогенизации флюида, изменяется от 1520 до 2100 бар при изменении температуры от 327 до 363°C. Первично-вторичные включения типа 3 в кварце из обр. БТ-26/2 гомогенизируются в жидкость при температуре 315°C, концентрация солей составляет 2.3 мас. %-экв. NaCl, плотность флюида 0.69 г/см<sup>3</sup>. Вторичные включения типа 3 в кварце из обр. БТ-

26/2 гомогенизируются в жидкость при температуре 210°C, концентрация солей составляет 2.1 мас. %-экв. NaCl, плотность флюида 0.87 г/см<sup>3</sup>.

Определение состава газов в исследуемых породах о. Б. Тютерс, проведенное на газовой хроматографической установке (оператор С.Н. Шанина), показало (табл. 8), что кроме воды и углекислоты в минералообразующем флюиде присутствуют восстанавливающие газы (Н<sub>2</sub>, СО, СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>, С<sub>3</sub>Н<sub>6</sub>, С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> и др.), которые, несомненно, повлия-

**Таблица 8.** Содержание летучих компонентов в породах о. Б. Тютерс, мкг/г**Table 8.** The content of volatile components in rock island B. Tyuters, µg/g

Образцы	T, C	Детектор – каратометр					Детектор – ДИП			
		H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
БТ-8/1	100–600	Н. о.	Н. о.	Н. о.	10.16	262	0.06	0.06	0.13	0.01
БТ-8/1	100–600	Н. о.	Н. о.	Н. о.	8.17	205	0.06	0.04	0.01	0.01
БТ-26/2	100–600	Н. о.	Н. о.	Н. о.	12.08	191	0.04	0.02	0.10	Н. о.
БТ-26/3	100–600	Н. о.	Н. о.	Н. о.	18.33	327	0.11	0.05	0.23	0.01
БТ-40	100–600	Н. о.	1.82	1.24	9.86	835	0.17	0.16	0.59	0.02
БТ-23/1	100–600	Н. о.	1.26	2.60	51.21	1063	0.23	0.12	0.38	0.03
БТ-8/2	100–600	2.90	0.19	36.26	323.30	6076	0.24	1.21	3.04	0.70

Примечание. Обр. БТ-8/1, БТ-26/2, БТ-26/3 – кварцит; БТ-23/1, БТ-40 – гранит; БТ-8/2 – железоглиноземистый метасоматит. В составе летучих компонентов присутствует также небольшое количество (<0.1 мкг/г) изобутана (iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), n-бутана (n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), бутилена (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>) и других углеводородов ряда C<sub>4</sub>–C<sub>5</sub>. Их высокое содержание установлено в составе летучих компонентов обр. БТ-8/2: iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – 0.07, n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – 0.10, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> – 0.97 мкг/г.

Note. Samples БТ-8/1, БТ-26/2, БТ-26/3 – quartzite; БТ-23/1, БТ-40 – granite; БТ-8/2 – alumina-iron metasomatit. In the composition of volatile components is also a small amount of (<0.1 µg/g) Isobutane (iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), n-butane (n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), butylene fraction it (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>) and other hydrocarbons to a number of C<sub>4</sub>–C<sub>5</sub>. Their high content found in the composition of volatile components БТ-8/2: iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – 0.07, n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> – 0.10, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> – 0.97 µg/g.

яли на Eh среды минералообразования. Обращает на себя внимание ограничение многих газовой-жидких включений, они имеют форму отрицательных кристаллов. Известно, что кварц растет и растворяется в щелочных растворах. Из этого следует, что кварциты длительное время находились в разогретом состоянии, за которое включения успели перекристаллизоваться, а активный флюид имел щелочную рН. Флюиды, содержащие небольшую концентрацию солей и высокую – углекислоты, характерны для пород низких и средних ступеней метаморфизма, а судя по измеренным *P-T* параметрам – не выше зеленосланцевой фации.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С большой степенью вероятности можно утверждать, что изученные кварцевые породы о. Б. Тютерс являются метасоматическими образованиями и их уместно называть вторичными кварцитами. Вероятнее всего, они образовались в результате углекислотного метасоматоза по высококремнистым, плагиоклаз-содержащим породам. Судя по сохранившимся теневым структурам в кварцитах (полосчатости, складкам, секущим “светлым” жилкам, напоминающим общий вид мигматизированных сланцев), наиболее предпочтительными исходными породами для вторичных кварцитов являлись свекофеннские сланцы, аналоги которых широко развиты в южной части Балтийского щита.

Анализ флюидных включений указывает на то, что образование вторичных кварцитов происходило в условиях средних температур 330–370°C. Подобные формирования в пределах Балтийского щита, в его восточной части, нам неизвестны. Окварцованные породы достаточно широко развиты в пределах Лапландского гранулитового и Беломорского подвижного поясов, но они более высокотемпературные и всегда структурированы согласно с метаморфическими породами раннедокембрийских комплексов.

Вторичные кварциты о. Б. Тютерс слагают изометричную структуру – типичную для аналогичных образований в районах широкого развития вулканических проявлений [Наковник, 1968]. Время формирования изученных кварцитов, вероятно, является раннерифейским. Кварциты прорываются комплексом гранитных даек, возраст которых по К-Аг датировкам равен 1660–1680 млн лет, т. е. они близки по возрасту гранитам рапакиви Выборгского массива, но немного предшествуют им. К востоку от острова расположено подводное продолжение Выборгского массива гранитов рапакиви (см. рис. 1). Поэтому можно связать формирование вторичных кварцитов с термальным влиянием этого массива.

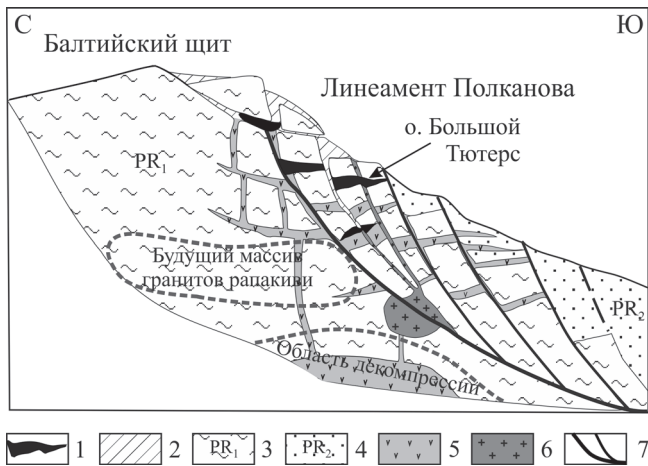
Однако в литературе отсутствуют данные о контактовых воздействиях гранитов рапакиви, тем бо-

лее о формировании вторичных кварцитов. Хотя граниты о. Б. Тютерс по большинству геохимических параметров весьма близки гранитам рапакиви, но по основному параметру, а именно по содержанию галлия (менее 20 ppm) и бария, они отличаются от классических гранитов рапакиви. Вероятно, граниты о. Б. Тютерс являются опережающей магматической фазой гранитов рапакиви. По мнению исследователей этого региона [Laitakari et al., 1996], гранитам рапакиви предшествовала фаза эруптивного магматизма, следы которого были в большинстве случаев уничтожены в ходе активных денудационных процессов, предшествовавших возникновению гранитов. Остатки этих вулканических проявлений известны на островах Гогланд и Соммерс.

Какие же тектонические и структурные элементы контролировали формирование залежей вторичных кварцитов? Пластовая форма этих залежей, наличие пегматитовых обособлений в гранитных дайках и достаточно высокая температура образования кварца указывают на то, что они возникли на некоторой глубине, а не на поверхности Земли. Подобные исходные условия для месторождения вторичных кварцитов Саян позволили исследователям связать процессы окварцевания с надвигами, в основании которых и происходили процессы углекислотного выщелачивания [Федоров и др., 2012]. Для рассматриваемых кварцитов мы также предполагаем тектоническую природу, но с принципиально другой направленностью движений – с процессами растяжения.

Известно, что по периферии Балтийского щита широко развиты субгоризонтальные швы и раздели в пределах верхней коры. Именно к ним приурочено большое количество уплощенных интрузий. Это интрузии Баренцевоморского комплекса Мурманского блока, Валаамский и Ропручейский силлы юго-восточной части щита. Граниты рапакиви также слагают пологие пластины. Идеализированная схема формирования пологих тектонических трещин, контролирующих расположение магматических тел, вторичных кварцитов и других метасоматитов показана на рис. 8. Подобные субгоризонтальные раздели, на наш взгляд, могут возникать в системе сбросов линеамента Полканова – краевой зоны Балтийского щита. Фундаментом и протолитом кварцитов, вероятно, являются свекофеннские сланцы, фрагмент которых в виде крупной будины встречен в одной из гранитных даек, в СЗ части острова. Вторичные кварциты о. Б. Тютерс, ассоциируются с раннерифейской эпохой. Это или предрифейская кора выветривания, или образования, связанные с вулканическими извержениями раннерифейского возраста. В пользу последнего предположения свидетельствует пространственная близость кварцитов к полю распространения раннерифейских вулкаников. Поскольку с большой долей вероятности предполагается,





**Рис. 8.** Принципиальная модель формирования вторичных кварцитов в субгоризонтальных тектонических разрезах сбросовой зоны линеймента Полканова.

1 – вторичные кварциты; 2 – железоглиноземистые метасоматиты (вне масштаба); 3 – породы свекофеннского комплекса (1950–1850 млн лет); 4 – рифейские отложения; 5, 6 – магматические образования, предшествующие главной фазе формирования гранитов рапакиви (1650 млн лет): 5 – основного состава, 6 – кислого; 7 – разломы.

**Fig. 8.** Schematic model of formation of secondary quartzite in the subhorizontal tectonic sections of fault zone of the Polkanov lineament.

1 – secondary quartzites; 2 – alumina-iron metasomatic rocks (no scale); 3 – rocks of Svecofennian complex (1950–1850 Ma); 4 – Riphean deposits; 5, 6 – magmatic formation prior to the main phase of formation of rapakivi granites (1650 Ma): 5 – basic composition, 6 – acid; 7 – faults.

что множество вулканов предшествовали или были синхронны с формированием гранитов рапакиви, но в течение раннерифейского времени они были денудированы [Laitakari et al., 1996]. На о. Гогланд наблюдается субиотрийская (раннерифейская) эрозионная поверхность, где кварцевые породы присутствуют как в гальках, так и в матрице. Недеформированные кварцевые арены (сортированные) известны в качестве ксенолитов в диабазовых дайках пояса Хёме, синхронного гранитам рапакиви [Rämö, 1991]. Наличие подобных ксенолитов свидетельствует о существовании седиментации кварцевых песков на эрозионной поверхности, возникшей до интрузии гранитов рапакиви.

В результате комплексных исследований коренных пород, встречающихся на о. Б. Тютерс, установлено, что кварциты, слагающие значительную часть поверхности острова, являются метасоматическими образованиями. Учитывая отсутствие в этом регионе аналогичных пород, важно сравнить их с известными эталонными объектами. Такковы-

ми могут служить вторичные кварциты, развитые в Казахстане. Трудными российских геологов разработана детальная модель формирования вторичных кварцитов [Наковник, 1968]. Ведущая роль в их образовании придается эксгалационному воздействию вулканов. Исходя из этой модели, можно предположить, что и вторичные кварциты о. Б. Тютерс возникли под влиянием флюидов, связанных с вулканической деятельностью, предшествующей формированию гранитов рапакиви.

### Масштабы проявления вторичных кварцитов

Вторичные кварциты в виде непрерывной полосы обнажаются вдоль западного берега о. Б. Тютерс почти на 3 км и прослеживаются на восток на 2 км, занимая всю его центральную часть (см. рис. 2). Судя по отдельным выходам кварцитов на севере и юге острова, площадь их развития не менее  $4 \times 2$  км, т. е.  $\approx 8$  км<sup>2</sup>. Учитывая, что при перепаде высот на острове более 20 м нигде не были встречены другие породы, за исключением редких гранитных даек и одного небольшого гранитного массива, мощность вторичных кварцитов принимается за 20 м. Поэтому прогнозные ресурсы ( $P_2$ ) вторичных кварцитов можно оценить в 370 млн т. Судя по минеральному составу кварцитов и качеству этого кварцевого сырья [Лютоев и др., 2016], они могут быть легко обогащены до нужной кондиции (в соответствии с требованиями современной промышленности): физическими методами – магнитной сепарацией от титаномагнетита и гематита и флотацией – от мусковита.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В центральной части Финского залива на острове Большой Тютерс выявлены значительные объемы существенно кварцевых пород ( $\text{SiO}_2$  более 90%). В результате комплексных исследований, включающих петрохимические, микроразондовые, изотопные, спектроскопические, термобарогеохимические и хроматографический анализ газов, можно утверждать, что эти породы являются вторичными кварцитами, образовавшимися под влиянием углекислотных растворов. Наличие теневых структур мигматитов, а также минералогические особенности кварцитов дают основание считать, что исходными породами, по которым сформировались вторичные кварциты, могли быть сланцы свекофеннского комплекса. Температура гомогенизации газовой-жидких включений – 330–370°C – указывает на высокотемпературную фацию вторичных кварцитов. Возраст даек гранитного состава, прорывающих вторичные кварциты, близок к 1660 и 1680 млн лет, что несколько древнее основной фазы гранитов рапакиви (1650–1550 млн лет). Он совпадает с предрифейской эпохой выветривания, в

конце которой произошло формирование крупнейших месторождений “типа несогласия”. Образование вторичных кварцитов о. Б. Тютерс, как и большинства классических проявлений подобного типа, мы связываем с флюидно-эксплозивной деятельностью вулканов, предшествующих гранитам рапакиви, продукты которых в виде лав основного и кислого состава сохранились в составе раннерифейской толщи, расположенной на о. Гогланд.

В отличие от окварцованных пород амфиболитовой и гранулитовой фаций, развитых на территории Балтийского щита, изученные вторичные кварциты являются более низкотемпературными образованиями. Благодаря этому алюминий из полевого шпата сланцев не вошел в решетку кварца, а полностью перешел в минералы железо-глиноземистых метасоматитов (слюды, каолинит, гематит) – близких по составу и структурному положению к бокситам. Учитывая огромные ресурсы данных кварцитов (более 370 млн т.), это проявление можно считать весьма перспективным на высокочистое кварцевое сырье, логистически приближенное к Северо-Западному промышленному району и г. Санкт-Петербургу. Образование субгоризонтальной плоскости, контролирующей формирование залежи вторичных кварцитов и трогов, выполненных раннерифейскими осадками и интрузиями гранитов рапакиви, мы связываем с тектонической активностью краевой части Балтийского щита, известной как линеамент Полканова.

Авторы выражают глубокую признательность аналитикам С.Н. Шаниной и Е.В. Ковальчук; Русскому географическому обществу за организацию комплексной экспедиции на о. Б. Тютерс, а также генеральному спонсору – публичному акционерному обществу “Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы” – за помощь в проведении экспедиционного сезона РГО 2015 г.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-05-00149, а также в рамках темы госзаданий ГИН РАН № 0135-2016-0012 и программы № 10 ОНЗ РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балуев А.С., Пржицалговский Е.С., Терехов Е.Н. (2009) Новые данные по тектонике Онежско-Кандалакшского палеорифта (Белое море). *Докл. АН*, **425**(2), 199-203.
- Богданов Ю.Б., Левченков О.И., Комаров А.Н., Яковлева М.А., Макеев А.Ф. (1999) О новом типе разреза нижнего рифея на Балтийском щите. *Докл. АН*, **366**(1), 76-78.
- Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*, (8), 16-27.
- Быдтаева Н.Г., Киселева Р.А., Милеева И.М. (2006) Прогнозно-поисковые модели месторождений особо чистого кварца. *Отечественная геология*, (4), 57-63.
- Валеев Р.Н. (1978) Авлакогены Восточно-Европейской платформы. М.: Недра, 152 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (новая серия). Лист Р-(35)-37 – Петрозаводск. (2000) Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 322 с.
- Лютюев В.П., Терехов Е.Н., Макеев А.Б., Лысюк А.Ю. (2016) Первые данные о спектроскопии и составе кварцосодержащих пород о-ва Большой Тютерс. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (3), 19-27.
- Наковник Н.И. (1968) Вторичные кварциты СССР и связанные с ними месторождения полезных ископаемых. М.: Недра, 335 с.
- Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б. (1987) Геохимические особенности рудообразующих растворов Зырянского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай). *Геохимия*, (3), 375-386.
- Реддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М.: Мир. Т. 1, 558 с. Т. 2, 632 с.
- Федоров А.М., Макрыгина В.А., Будяк А.Е., Непомнящих А.И. (2012) Новые данные о геохимии и механизме формирования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг. *Докл. АН*, **442**(2), 244-249.
- Brown P. (1989) FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *Amer. Mineral.*, **74**, 1390-1393.
- Collins P.L. (1979) Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Econ. Geol.*, **74**, 1435-1444.
- Laitakari I., Rämö O.T., Suominen V., Niin M., Stepanov K., Amantov A. (1996) Subjotnian: rapakivi granites and related rocks of the gulf of Finland. *Geol. Survey Finland, Spec. Pap.*, **21**, 59-97.
- Precambrian basement of the Gulf of Finland and Surrounding area, 1 : 1 mill. (1994) Ed. by T. Koistinen. *Geological Survey of Finland*, Espoo.
- Rämö O.T. (1991) Petrogenesis of the Proterozoic rapakivi granites and related basic rocks of southern Fennoscandia: Nd and Pb isotopic and general geochemical constraints. *Geol. Survey Finland, Bull.*, **355**, 155 p.

#### REFERENCES

- Baluyev A.S., Przhizhalskiy E.S., Terekhov E.N. (2009) New data on tectonics of Onega-Kandalaksha paleorift (the White Sea). *Dokl Akad. Nauk*, **425**(2), 249-252. (In Russian)
- Bogdanov Ju.B., Levchenkov O.I., Komarov A.N., Yakovleva M.A., Makeev A.F. (1999) About a new type of section of the lower Riphean in the Baltic shield. *Dokl. Akad. Nauk*, **366**(1), 76-78. (In Russian)
- Borisenko A.S. (1977) Study of salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by method of kriometrii. *Geol. Geofiz.*, (8), 16-27. (In Russian)
- Brown P. (1989) FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *Amer. Mineral.*, **74**, 1390-1393.
- Bydtaeva N.G., Kiseleva R.A., Mileeva I.M. (2006) Prognostic-search models of deposits of high purity quartz. *Otechestvennaya geologiya*, (4), 57-63. (In Russian).

- Collins P.L. (1979) Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Econ. Geol.*, **74**, 1435-1444.
- Fedorov A.M., Makrygina V.A., Budyak A.E., Nepomnyashchikh A.I. (2012) New data on the geochemistry and mechanism of formation of quartzites of the Bural-Sar'dag deposit (Eastern Sayan Mountains). *Dokl. Akad. Nauk*, **442**(2), 244-249. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federacii. Masshtab 1 : 1 000 000 (novaya seriya). List. R-(35)-37 – Petrozavodsk. Obyasnitel'naya zapiska.* (2000) [State Geological map of Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (new series). Sheet R-(35)-37 – Petrozavodsk. Explanatory Note]. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 322 p. (In Russian)
- Laitakari I., Rämö O.T., Suominen V., Niin M., Stepanov K., Amantov A. (1996) Subjotnian: rapakivi granites and related rocks of the gulf of Finland. *Geol. Surv. Finland, spec. Pap.*, **21**, 59-97.
- Lyutoev V.P., Terekhov E.N., Makeev A.B., Lysyuk A.Ju. (2016) The first data on composition and spectroscopy of quartz-bearing rocks from the Bol'shoi Tyuters island. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geologiya i Razvedka*, (3), 19-27. (In Russian)
- Nakovnik N.I. (1968) *Vtorichnye kvartcity SSSR i svyazannye s nimi mestorozhdeniya poleznyh iskopaemyh* [Secondary quartzites of the USSR and associated mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 335 p. (In Russian)
- Precambrian basement of the Gulf of Finland and Surrounding area, 1 : 1 mill. (1994) Ed. by T. Koistinen. *Geological Survey Finland*, Espoo.
- Prokof'ev V.Yu., Naumov V.B. (1987) Geochemical features of ore-forming solutions of Zyryanovskoye pyrite-polymetallic deposit (Rudny Altai). *Geokhimiya*, (3), 375-386. (In Russian)
- Redder E. (1987) *Flyuidnye vklyucheniya v mineralah* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir Publ. V. 1, 558 p. V. 2, 632 p. (In Russian)
- Rämö O.T. (1991) Petrogenesis of the Proterozoic rapakivi granites and related basic rocks of southern Fennoscandia: Nd and Pb isotopic and general geochemical constraints. *Geol. Survey Finland, Bull.*, **355**, 155 p.
- Valeev R.N. (1978) *Avlakogeny Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Avlakogens of the East European Platform]. Moscow, Nedra Publ., 152 p. (In Russian)