

*Hast N.* The measurement of rock pressure in mines // Sveriges Geologiska Undersokning. 1958. No. 560. P. 183.

*Heim A.* Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Topographie der Toedi-Windgaellen-Gruppe. Bale, 1878.

*Сведения об авторах*

**Каспарьян Эдуард Варужанович**

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, kasp@goi.kolasc.net.ru

**Федотова Юлия Викторовна**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт ДВО РАН, fjulia@mail.ru

**Кузнецов Николай Николаевич**

научный сотрудник, Горный институт ФИЦ КНЦ РАН, nikavalon@mail.ru

**Kasparyan Eduard Varuzhanovich**

Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher, Mining Institute of FRC KSC RAS, kasp@goi.kolasc.net.ru

**Fedotova Yulia Victorovna**

PhD (Engineering), Senior Researcher, Mining Institute of FEB RAS, fjulia@mail.ru

**Kuznetsov Nikolay Nikolaevich**

Researcher, Mining Institute of FRC KSC RAS, nikavalon@mail.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.017

УДК (552.086 : 552.16 : 552.312)

**А. В. Кервинен<sup>1</sup>, С. В. Егорова<sup>1</sup>, Е. В. Ковальчук<sup>2</sup>, А. В. Степанова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

**ЦИРКОН В ГАББРО-ПЕГМАТИТАХ БОЯРСКОГО МАССИВА  
БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА ФЕННОСКАНДИИ:  
СТРОЕНИЕ, СОСТАВ И УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

**Аннотация**

В результате комплексного изучения морфологии и состава циркона Боярского массива Беломорского подвижного пояса установлено его зональное внутреннее строение: выделяются магматические ядра и метаморфические каймы. Температуры кристаллизации магматического и метаморфического циркона, полученные с использованием Ti-in-Zr-термометра, близки ( $T = 943\text{--}1108\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и соответствуют температурам кристаллизации расплава. Полученные результаты ограничивают использование Ti-in-Zr-термометра для оценки условий метаморфизма в высоко-Ti базитах.

**Ключевые слова:**

циркон, метагабброиды, Беломорский подвижный пояс, Фенноскандинавский щит, P-T-условия кристаллизации.

**A. V. Kervinen<sup>1</sup>, S. V. Egorova<sup>1</sup>, E. V. Kovalchuk<sup>2</sup>, A. V. Stepanova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Geology of KarRC RAS, Petrozavodsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

## **ZIRCON IN GABBRO-PEGMATITES OF BOYARSKY MASSIF IN THE BELOMORIAN MOBILE BELT OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD: STRUCTURE, COMPOSITION AND CRYSTALLIZATION CONDITIONS**

### **Abstract**

Integrated study of the internal structure and composition of zircon of the Boyarsky massif in the Belomorian mobile belt revealed a complex internal structure: magmatic cores and metamorphic rims. The temperature of magmatic and metamorphic zircon crystallization obtained using a Ti-in-Zr thermometer close in value ( $T = 943\text{--}1108\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and correspond to the values of melt crystallization. The results limit the use of Ti-in-Zr thermometers to evaluate metamorphism conditions in high-Ti basites

### **Keywords:**

*zircon, metagabbro, Belomorian mobile belt, Fennoscandian shield, PT-conditions of crystallization.*

Докембрийские подвижные пояса со сложной полиметаморфической историей часто сохраняют реликты нескольких тектоно-метаморфических процессов, которые бывает трудно отделить друг от друга из-за сходства РТ-параметров разновозрастных событий. В качестве структурных маркеров в данном случае могут быть использованы надежно датированные магматические и метаморфические комплексы с четкой геологической позицией.

Беломорский подвижный пояс (БПП), расположенный в восточной части Фенноскандинавского щита, сложен преимущественно архейскими комплексами, претерпевшими неоднократные метаморфизм в условиях повышенных и высоких давлений и деформации как в архее, так и в палеопротерозое (Володичев, 2005). Большинство исследователей рассматривают БПП как глубоко эродированный юго-западный форланд Лапландско-Кольского орогена, возраст которого оценивается в 2,0–1,86 млрд лет (Daly et al., 2006). Широко распространенные в пределах БПП палеопротерозойские интрузии метабазитов часто используют в качестве маркеров, позволяющих отделить архейские тектоно-метаморфические процессы от палеопротерозойских (Vabarina et al., 2017). Характерной особенностью этих интрузий является наличие коронарных структур, свидетельствующих о том, что равновесие во время метаморфизма достигалось лишь локально, и затрудняющих оценку РТ-условий метаморфических преобразований методами классической и мультиравновесной термобарометрии. Определение условий кристаллизации метаморфического циркона в таких случаях может являться альтернативным методом при расшифровке истории формирования пород.

### **Объект исследования**

Объектом изучения являлся Боярский габбронорит-троктолитовый массив — типичный представитель друзитов БПП. Боярский массив расположен в центральной части БПП, имеет лополитообразную форму, его площадь составляет около 4,5 км<sup>2</sup> (Степанов, 1981). Породы массива в различной степени метаморфизованы. Краевая часть интрузива сложена полевошпатовыми амфиболитами. Породы центральной части тела также амфиболитизированы,

в них хорошо выражены типичные для друзитов коронарные структуры, но сохраняются и реликтовые первично-магматические структуры и минералы. В основании разреза интрузива, вблизи северного контакта с гнейсами, залегают меланократовые метатроктолиты с шпировидными обособлениями метаперидотитов, а к верхней его части приурочены относительно лейкократовые метагаббро. Метаанортозиты в Боярском массиве образуют жилковидные обособления в метатроктолитах. Габбро-пегматиты установлены в виде небольших линзовидных тел в южной части массива и сохранили массивные текстуры и реликты габбро-офитовой структуры (Степанов, 1981). Реликтовые магматические минералы представлены плагиоклазом, клинопироксеном, ортопироксеном и оливином. Среди новообразованных метаморфических минералов установлены плагиоклаз, диопсид, гранат, амфибол, рутил и титанит, которые часто образуют реакционные каймы. В габбро-пегматитах присутствует кварц.

Оценка условий метаморфических преобразований пород Боярского массива с использованием Grt-Hbl-термометра предполагает, что формирование гранат-амфиболовой ассоциации происходило при  $T = 530\text{--}580$  °С. Реконструкция P-T-параметров метаморфических преобразований с использованием методов мультиравновесной термобарометрии (TWEEQU, Verma, 1991) показала, что породы Боярского массива были метаморфизованы при  $T = 630\text{--}716$  °С и  $P = 8,0\text{--}9,4$  кбар.

Цирконы, изучавшиеся в рамках данного исследования, были выделены из габбро-пегматитов Боярского массива. Они представлены как частично ограниченными, так и неправильной формы кристаллами, размер которых варьирует от 0,16 до 0,5 мм. В основном преобладают короткопризматические зерна и их обломки. Большинство зерен характеризуются однородной окраской коричневых тонов, отдельные участки зерен циркона сохранили прозрачность, но преобладают полупрозрачные разновидности.

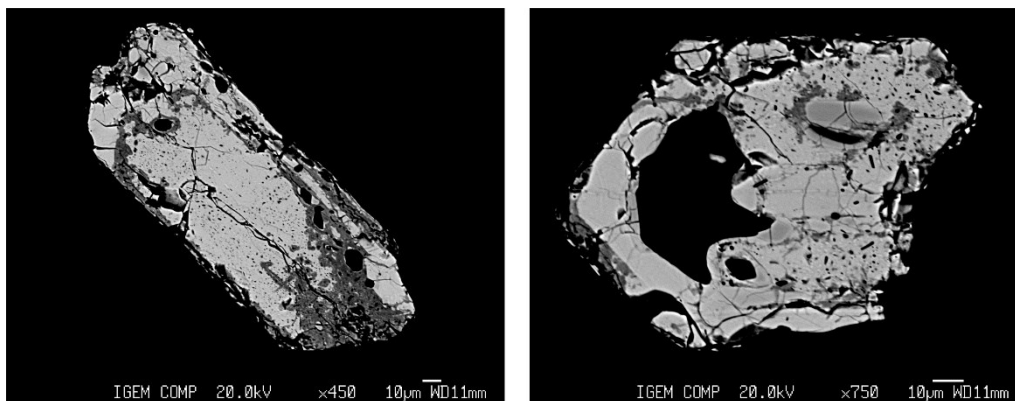
### **Методы исследования**

Изучение морфологии и химического состава цирконов Боярского массива проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan VEGA II LSH с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) в Центре коллективного пользования (ЦКП) ФИЦ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск. Анализ содержаний рассеянных элементов в цирконе проводился на волновом электронно-зондовом микроанализаторе (EPMA) JEOL JXA-8200 в ИГЕМ РАН (ЦКП «ИГЕМ АНАЛИТИКА»), г. Москва.

### **Результаты**

Детальные исследования цирконов Боярского массива на СЭМ позволили установить несколько типов зерен. Выделяются мелкие однородные зерна с «пористыми» участками, наиболее часто встречающиеся, и относительно крупные кристаллы, имеющие зональное внутреннее строение. Краевые части зерен сложены однородным на изображениях в обратно-рассеянных электронах (BSE) цирконом, содержащим включения титанита, кварца и амфибола. Центральные части зерен чаще всего характеризуются высокой степенью метамиктных изменений и содержат участки «пористого», насыщенного мелкими включениями циркона (рис.). Наблюдаемые неоднородности строения зерен отражаются и в химическом, и в редкоэлементном составе циркона. От центра

к краю кристаллов выделяются следующие зоны: реликтовые ядра, «пористый» и метамиктный циркон, краевые части зерен и внешняя однородная оторочка.



Микрофотографии зерен циркона из габбро-пегматитов Боярского массива в обратно-отраженных электронах (BSE)

SEM-BSE micrographs of zircon grains in gabbro-pegmatites of Boyarsky massif

Реликтовые ядра установлены в центральных частях зерен, характеризуются однородным строением и не содержат включений других минералов. Размер сохранившихся ядер 10–20 мкм, они обогащены Y (2500–5250 ppm) и Yb (400–600 ppm) и имеют повышенные концентрации Dy (52–113 ppm). Содержание Ti варьирует от 54 до 66 ppm. Ядра окружены «пористым» и метамиктным цирконом. Краевые части зерен циркона характеризуются наличием большого количества ксеноморфных включений амфибола размером 10–50 мкм, а также титанита и кварца. Краевые части кристаллов циркона характеризуются низкими содержаниями Y (990–1100 ppm), Yb (140–250 ppm) и Dy (17–26 ppm). Концентрации Ti = 36–58 ppm. Внешняя оторочка в BSE выражена слабо и имеет однородное внутреннее строение, ее химический состав не изучался из-за малой мощности.

### Обсуждение результатов

Особенности внутреннего строения, вариации содержаний Y и тяжелых РЗЭ, а также наличие и состав включений в пределах зерен циркона позволили выделить несколько генераций цирконов в габбро-пегматитах Боярского массива: (1) реликтовый циркон, кристаллизовавшийся из расплава, установлен в центральных частях зерен; (2) метаморфический циркон, сформированный в равновесии с гранатом, на что указывают низкие концентрации Y и РЗЭ, отвечает краевым частям зерен циркона. «Пористый» и метамиктный циркон представляют результат изменений, вероятнее всего, раннего магматического циркона.

Присутствие Ti в цирконе позволяет использовать его в качестве геотермометра (Watson et al., 2006). Однако в цирконах различного генезиса из габбро-пегматитов Боярского массива концентрации Ti близки и составляют от 36 до 66 ppm. Соответственно, температуры кристаллизации краевых (метаморфических) и центральных (магматических) частей зерен циркона,

полученные с использованием термометра Ti-in-Zr, близки и составляют 943–1108 °С. Полученные температуры, наиболее вероятно, соответствуют температурам кристаллизации расплава.

### **Выводы**

В пределах Боярского массива, породы которого характеризуются низкими концентрациями Ti (Степанов, 1981), габбро-пегматиты являются разновидностью пород, наиболее богатой Ti. И Ti, и Zr являются элементами, несовместимыми с базальтовыми расплавами, и накапливаются в остаточных расплавах, в случае Боярского массива — в габбро-пегматитах. Поэтому цирконы, кристаллизовавшиеся из расплавов, характеризуются высокими содержаниями Ti (от 36 до 66) на уровне, критичном для оценки температур кристаллизации циркона (Watson et al., 2006). Таким образом, можно предположить, что содержание Ti в цирконе коррелирует с содержанием Ti в породе и не зависит от температуры кристаллизации. Соответственно, близкие значения T, °С в краевых и центральных частях циркона также зависят от высокого содержания Ti в породе.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИГ КарНЦ РАН (№ гос. рег. темы АААА-А18-118020290085-4).*

### **Литература**

*Володичев О. И.* Метаморфизм фации дистеновых гнейсов на примере беломорского комплекса. Л.: Наука, 2005. 170 с.

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

*Babarina I. I., Stepanova A. V., Azimov P. Ya., Serebryakov N. S.* Heterogeneity of basement processing in the Paleoproterozoic Lapland-Kola collision orogen, White Sea province of the Fennoscandian shield // *Geotectonics*. 2017. Vol. 5. P. 3–19.

*Berman R. G.* Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // *The Canadian Mineralogist*. 1991. Vol. 29. P. 833–85.

*Daly J. S., Balagansky V. V., Timmerman M. J., Whitehouse M. J.* The Lapland-Kola orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere // *Geol. Soc. London, Mem.* 2006. Vol. 32, No. 1. P. 579–598.

*Harley S. L., Kelly M. N., Möller A.* Zircon behavior and the thermal histories of mountain chains // *Elements*. 2007. Vol. 3. P. 25–30.

*Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B.* Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2006. Vol. 151. P. 413–433.

### **Сведения об авторах**

#### **Кервинен Анна Валерьевна**

аспирант, Институт геологии КарНЦ РАН, Kervinen@mail.ru

#### **Егорова Светлана Валерьевна**

кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии КарНЦ РАН, zumlic@mail.ru

#### **Степанова Александра Владимировна**

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии КарНЦ РАН, sa07sa@mail.ru

**Ковальчук Елена Владимировна**

младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, elena7kovalchuk@gmail.com

**Kervinen Anna Valerievna**

Graduate Student, Institute of Geology of KarRC RAS, Kervinen@mail.ru

**Egorova Svetlana Valerevna**

PhD (Geology & Mineralogy), Researcher, Institute of Geology of KarRC RAS, zumlic@mail.ru

**Stepanova Alexandra Vladimirovna**

PhD (Geology & Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology of KarRC RAS, sa07sa@mail.ru

**Kovalchuk Elena Vladimirovna**

Junior Researcher, IGEM RAS, elena7kovalchuk@gmail.com

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.018

УДК 552.3 + 552.11 + 551.243

**П. А. Кириллова**

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия  
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

**ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ РАННЕОРОГЕННЫХ ИНТРУЗИЙ  
СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ И ИХ ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
(НА ПРИМЕРЕ МАССИВОВ ВЕЛИМЯКИ, КААЛАМО, КУРКИЁКИ)****Аннотация**

Проведена оценка петро- и геохимических особенностей трех раннепротерозойских габброидных массивов Северного Приладожья. Изученные разновозрастные интрузии отличаются разной тектонической позицией. Применение классификационных и дискриминационных (тектонических) диаграмм позволило проследить некоторые взаимосвязи между составами пород и их положением в региональных разновозрастных структурах, а также дать оценку палеогеодинамических условий проявления магматизма.

**Ключевые слова:**

*Северное Приладожье, габброиды, петрогеохимия, тектоническая позиция.*

**P. A. Kirillova**

Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint Petersburg, Russia  
Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

**TECTONIC POSITION OF EARLY OROGENIC INTRUSIONS OF THE  
NORTHERN LADOGA AREA AND THEIR PETROCHEMICAL FEATURES  
(BY THE EXAMPLE OF VELIMÄKI, KAALAMO, KURKIJOKI MASSIFS)****Abstract**

We studied the petro- and geochemical features of the three Early Proterozoic intrusions of gabbro in the Northern Ladoga area. All intrusions have the same ages but are different in their tectonic positions. The classification and discriminatory (tectonic) diagrams allowed us to trace some relationships between rock compositions and their position in regional structures of different ages. An estimation of the paleogeodynamic conditions of magmatism is given.

**Keywords:**

*Northern Ladoga area, gabbroides, petrogeochemistry, tectonic position.*