

ГЕОЛОГИЯ

УДК 549.646

*Н. И. Пономарева, В. В. Гордиенко, Н. С. Шурекова***ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БЕРИЛЛА
В МЕСТОРОЖДЕНИИ «БОЛЬШОЙ ЛАПОТЬ» (КОЛЬСКИЙ П-ОВ)**

Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург,
Университетская набережная 7/9

Приведены результаты исследования берилла из малоизученных пегматитов месторождения «Большой Лапоть» (Кольский п-ов) и оценка физико-химических параметров формирования бериллсодержащей ассоциации в одной из пегматитовых жил. *PT* условия определены различными геотермобарометрами. Температура составляет 415–460°C. Давление равно 0,8–2 кбар.

На основе расчетных методов химической термодинамики оценены активности ионов в минералообразующей среде, формирующей бериллсодержащую ассоциацию: $a_{\text{FeOH}} = 10^{-4,5}$, $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} \leq 10^{-4,4}$, $a_{\text{AlOH}} = 10^{-2,3}$, $a_{\text{Ca}^{2+}} = 10^{-4,8}$, $a_{\text{Na}^+} = 10^{-1}$, $a_{\text{H}_4\text{SiO}_4} = 10^{-2,8}$, $a_{\text{Be}^{2+}} = 10^{-3,5}$, $a_{\text{K}^+} = 10^{-3}$ при $\text{pH} = 4,2$. Библиогр. 27 назв. Ил. 7. Табл. 5.

Ключевые слова: берилл, гранитные пегматиты, геотермобарометры, флюидные включения, минеральные равновесия.

*N. I Ponomareva., V. V. Gordienko, N. S. Shurekova***PHYSICO-CHEMICAL CIRCUMSTANCES OF BERYL GENERATION IN "BOL'SHOY LAPOT'
DEPOSIT (KOLA PENINSULA)**

St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian federation

Research results are delivered for beryl from pegmatite of little-studied Bol'shoi Lapot' deposit (Kola Peninsula), and physicochemical parameters of beryl containing association generation are estimated for one of pegmatite streaks. *PT* conditions are determined by different geothermobarometers. The temperature is 415–460°C, the pressure is 0,8–2,0 kbar.

Ion activities in mineral generating environment, which is forming the beryl containing association, are determined in terms of chemical thermodynamic calculation techniques: $a_{\text{FeOH}} = 10^{-4,5}$, $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} \leq 10^{-4,4}$, $a_{\text{AlOH}} = 10^{-2,3}$, $a_{\text{Ca}^{2+}} = 10^{-4,8}$, $a_{\text{Na}^+} = 10^{-1}$, $a_{\text{H}_4\text{SiO}_4} = 10^{-2,8}$, $a_{\text{Be}^{2+}} = 10^{-3,5}$, $a_{\text{K}^+} = 10^{-3}$ by $\text{pH} = 4,2$. Refs 27. Figs 7. Tables 5.

Keywords: beryl, granitic pegmatites, geothermobarometers, fluid inclusions, mineral equilibrium.

Месторождение «Большой Лапоть» находится на северо-западе Кольского полуострова в районе озера Большой Лапоть, в 20 км к юго-востоку от Мурманска по шоссе на дороге, ведущей в поселок Серебрянка.

Геологическая характеристика района подробно приведена в работах Е. С. Антонюка [1–3]. По его данным, месторождение приурочено к Кильдинско-Черногуб-

ской грабен-синклинали — к типичной шовной зоне, зажатой между двумя блоками нижнеархейского фундамента и сложенной породами зеленокаменного пояса. Сама же структура является северо-западным продолжением позднеархейского зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, в котором сосредоточены крупные месторождения редкометалльных пегматитов.

Эффузивно-осадочные породы Кильдинско-Черногубской синклинальной зоны в районе Большелаптинского пегматитового поля окружены прерывистым кольцом небольших массивов плагиоклазовых и плагиомиоклиновых гранитов, которые многими исследователями рассматриваются как материнские интрузии по отношению к гранитным пегматитам района.

Согласно данным Е. С. Антонюка [2–3], на сравнительно хорошо обнаженной части Большелаптинского пегматитового поля, равной 16 км², зарегистрировано более 300 пегматитовых тел, которые располагаются преимущественно кустами, реже поодиночке и залегают в сланцеватых плагиоклазовых амфиболитах, амфиболо-биотитовых и меланократовых биотитовых и двуслюдяных гнейсах. По мере удаления от контактов с гранитами происходит последовательное увеличение размеров пегматитовых жил, но число их при этом сокращается.

Пегматитовые тела характеризуются довольно однообразным валовым составом, но, тем не менее, в них отмечается значительное количество минеральных агрегатов, различающихся по структурным признакам, местоположению в пегматитовой жиле, относительному времени и способу образования. Эти минеральные агрегаты, парагенезисы или комплексы, четко разделяются на две морфогенетические группы.

К первой группе парагенетических комплексов относятся кварцево-полевошпатовые и существенно полевошпатовые агрегаты средне-, крупно- и гигантозернистого сложения. Они чаще всего располагаются закономерно относительно контакта пегматитовых тел. Сюда входят: среднезернистый гранит-пегматит; средне-крупнозернистый гранит-пегматит порфиroidной структуры; крупнозернистый плагио-микроклиновый агрегат пегматоидной структуры; крупнозернистый кварцево-микроклиновый агрегат графической структуры (письменный гранит); гигантозернистый кварцево-микроклиновый агрегат блоковой структуры (с обособлением кварцевых ядер). Все эти агрегаты — разновидности пегматитовых пород образовались в жилах до процесса альбитизации и по этому признаку условно могут быть названы «ранними».

К второй морфогенетической группе парагенетических ассоциаций относятся существенно альбитовые замещающие комплексы: пластинчатого альбита, мелкозернистого и сахаровидного альбита с мусковитом, турмалином, бериллом и апатитом. Для них характерна приуроченность к трещиноватым и ослабленным зонам. Эти альбитовые структурно-минеральные комплексы образуются путем метасоматического замещения ранее сформированных парагенезисов первой группы [1].

Е. С. Антонюком [3] в результате изучения внутреннего строения пегматитовых жил района и их минерального состава была предложена следующая типизация, основанная на количественном соотношении «ранних» минеральных агрегатов в пегматитовых телах:

1-й тип — жилы, представленные целиком гранит-пегматитом;

2-й тип — сложены приблизительно поровну гранит-пегматитом и агрегатами крупнокристаллического полевого шпата с редкими обособлениями кварца;

3-й тип — состоит на 80-90% из агрегатов крупнокристаллического полевого шпата пегматоидной структуры с обособлениями блокового кварца;

4-й тип — образованы примерно поровну гранит-пегматитом, полевошпатовыми агрегатами пегматоидной структуры и блоковыми агрегатами калиевого полевого шпата (КПШ) с обособлениями кварца;

5-й тип — жилы, в строении которых участвуют преимущественно кварц-полевошпатовые агрегаты блоковой структуры, при этом на КПШ приходится до 60–70% объема. Большинство из пегматитовых жил этого типа — крупные пологопадающие тела, простирающиеся на 400–1000 и более метров при мощности до 60–80 м.

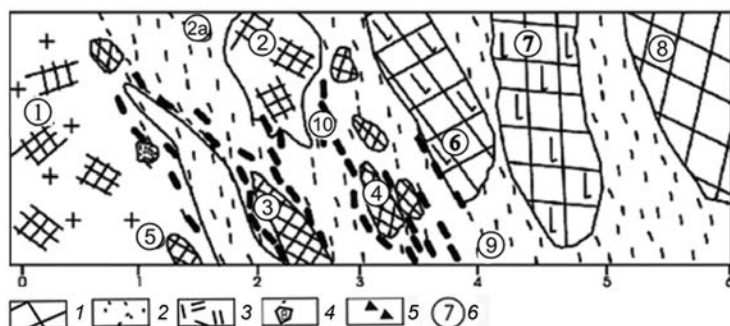


Рис. 1. Зарисовка приконтактной зоны пегматитовой жилы № 7 с вмещающими породами (выполнена В. В. Гордиенко):

1 — кристаллы КПШ; 2 — блоковый кварц; 3 — кварц-калиево-полевошпатовый пегматит графической структуры; 4 — мелкозернистый мусковит — турмалин-альбитовый агрегат; 5 — пегматит, обогащенный турмалином; 6 — порфиридный гранит-пегматит; 7 — место взятия соответствующего образца.

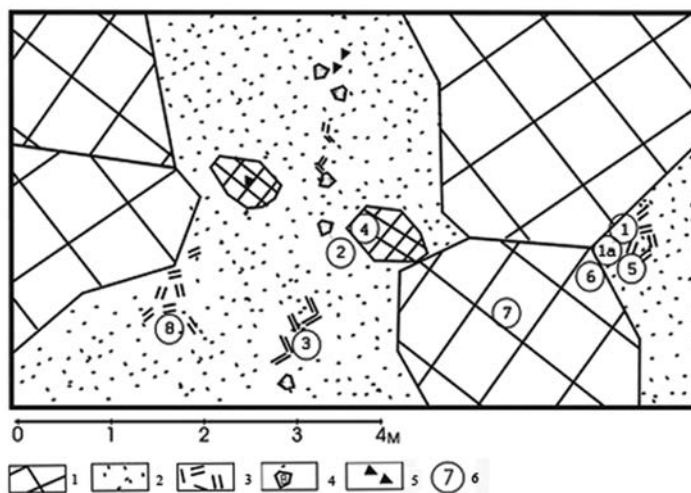


Рис. 2. Зарисовка центральной зоны пегматитовой жилы № 7 (выполнена В. В. Гордиенко):

1 — кристаллы КПШ; 2 — блоковый кварц; 3 — кварц — мусковитовый агрегат; 4 — кристаллы берилла; 5 — кристаллы турмалина; 6 — место взятия соответствующего образца.

Изученная пегматитовая жила № 7 относится к 5-му типу жил, сложенных блоковым КПШ и кварцем при резко подчиненном развитии других «ранних» минеральных агрегатов.

Вдоль контакта с вмещающими породами в пегматитовой жиле (рис. 1) прослеживается маломощная (0,5–3 м) и не выдержанная по простиранию краевая зона, образованная порфиридовидным гранит-пегматитом и кварц-полевошпатовыми агрегатами графической структуры. Мощность её в лежачем боку значительно больше, чем в висячем. Эта зона рассечена прожилками кварцево-мусковитового агрегата, содержащего большое количество турмалина и несколько меньше — граната. На некотором удалении от контактов прослеживается гигантозернистый агрегат КПШ с гнездами кварца до 2–3 м в поперечнике (рис. 2), который занимает почти весь объем пегматитового тела. В жиле № 7 наблюдается широкое разно-

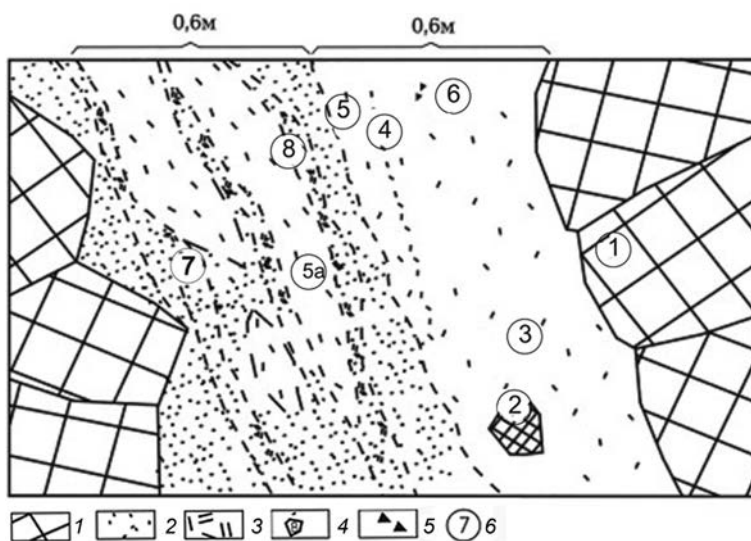


Рис. 3. Зарисовка центральной зоны пегматитовой жилы № 7, сложенной турмалин — альбитовыми замещающими комплексами с бериллом (выполнена В. В. Гордиенко):

1 — кристаллы КПШ; 2 — блоковый кварц; 3 — мелкозернистый турмалин-альбитовый комплекс с гранатом и бериллом; 4 — кварц-мусковитовый агрегат; 5 — кристаллы турмалина; 6 — место взятия соответствующего образца.

образии альбитовых замещающих комплексов: мелкопластинчатый, сахаровидный, реже — крупнопластинчатый клевеландитовый, к которым приурочены турмалин, гранат, берилл, апатит (рис. 3).

Краткая характеристика минералов, ассоциирующих с бериллом

Главные породообразующие минералы представлены КПШ, кислым плагиоклазом (альбитом) и кварцем. Второстепенные по распространению минералы: турмалин-шерд, берилл, гранат (спессартин) и апатит. Они приурочены

к альбитовому агрегату, рассекающему ранее образованный кварц-полевошпатовый пегматит. Присутствуют также золотисто-зеленый мусковит, циркон и магнетит.

Калиевый полевой шпат наблюдается в кварц-полевошпатовом пегматите графической структуры (КПШ I) и в агрегате блоковой структуры, где он представлен пегматоидными выделениями от 2–3 см до 1,5 м в центральной части жилы (КПШ II).

По содержанию щелочных элементов КПШ I и КПШ II несколько различаются. КПШ I характеризуется более высоким содержанием Na_2O и заметно меньшим — Li_2O (соответственно для КПШ I (средние значения в масс %): Na_2O — 2,21 и Li_2O — 0,0051, а для КПШ II (средние значения в масс %): Na_2O — 1,73 и Li_2O — 0,0094). Тенденция к накоплению цезия намечается в более поздней генерации калиевого полевого шпата. По содержанию рубидия они практически не различаются. Определение щелочных элементов в минералах выполнено в СПбГУ (аналитик А. Н. Ильина).

Плагиоклаз представлен таблитчатым или сахаровидным агрегатом белого цвета, совместно с турмалином, гранатом и мусковитом, рассекающим не только блоки микроклина, но и довольно часто кварцевое ядро жилы. Основность плагиоклаза была определена иммерсионным методом и соответствует альбиту — № 0–5. Эти данные подтверждаются и результатами химического анализа. Содержание анортитового минала, по расчётам, не превышает 3,2%.

Мусковит в жиле № 7 совместно с альбитом и турмалином образует жилообразные выделения, рассекающие блоки микроклина и кварца. Нередко наблюдаются гнездовые скопления таблитчатых кристаллов мусковита зеленовато-желтого и золотистого цвета. Размер отдельных кристаллов мусковита не превышает 2–3 см.

Состав мусковита, по данным химического анализа, выполненного в СПбГУ (аналитик В. В. Семенова), следующий (в масс. %): SiO_2 — 46,58, TiO_2 — 0,09, Al_2O_3 — 36,36, FeO — 2,55, MnO — 0,02, MgO — 0,107.

Щелочные элементы в мусковитах из пегматитовой жилы месторождения «Большой Лапоть» варьируют в следующих интервалах (в масс. %): K_2O — от 9,87 до 10,28, Na_2O — от 0,47 до 0,50, Li_2O — от 0,05 до 0,12, Cs_2O — от 0,0075 до 0,023, Rb_2O — от 0,12 до 0,20.

Турмалин в пегматитовой жиле № 7 является характерным второстепенным минералом. Совместно с альбитом он в виде жилообразных выделений рассекает блоки микроклина и кварца. Кроме того, турмалин образует гнездообразные скопления небольших кристаллов в ассоциации с бериллом и апатитом. По составу турмалин соответствует шерлу. Содержание тёмноцветных компонентов, по данным микронзондового анализа, варьирует (в масс.%): FeO 14,96 — 15,45; MnO — 0,48 — 0,51; MgO — 0,35 — 0,40. Все микронзондовые исследования минералов проводились Ю. Л. Крецером (лаборатория ЗАО «Механобр-Аналит») на микроскопе «Самскап-4».

Гранат в изученных пегматитах встречается в виде идиоморфных кристаллов красновато-коричневого цвета размером до 0,3 см и может быть отнесён к аксессуарным минералам. По составу он является спессартином, содержащим (в масс. %): FeO 15,89 — 14,82; MnO — 26,9 — 28,07; MgO — 0,14–0,55

Апатит в пегматитовой жиле № 7 широко распространён. Он образует в альбите, калиевом полевом шпате и берилле голубовато- и тёмно-зелёные кристаллы размером до 0,5–1 см.

По данным микрозондового анализа, в нём присутствуют компоненты в следующих количествах (в масс %): FeO — 0,27 — 0,15; MnO — 3,96 — 2,07; SrO — 0,24–0,36; Ce₂O₃ — 0,24–0,19; Cl — 0,02–0,11.

Циркон относится к аксессуарным минералам пегматитовой жилы № 7. Он встречается в альбит-турмалиновом агрегате в виде хорошо образованных кристаллов размером до 2–3 мм. По данным микрозондового анализа, в нём содержатся следующие примеси (в масс. %): HfO₂ (5,8); FeO (0,35–0,7); MnO (0,16 до 1,12); ThO₂ (0,06–0,38).

Исследования берилла из пегматитовой жилы № 7

Берилл по распространённости в пегматитовой жиле № 7 месторождения «Большой Лапоть» может быть отнесён к второстепенным минералам. Он встречается в виде желтоватых полупрозрачных кристаллов размером 1,5–5 см в кварц-альбитовом агрегате совместно с турмалином, гранатом и апатитом.

По данным микрозондового анализа, в берилле из пегматитовой жилы № 7 содержится Na₂O в количестве 1,47–1,95 % и FeO — 0,30–0,33%. Результаты анализов представлены в табл. 1.

Поскольку Е. С. Антонюком [1–3] показано, что жилы месторождения «Большой Лапоть» приурочены к пегматитовому полю, которое является продолжением пегматитового поля Колмозеро-Воронья, нам представляется интересным сравнить характеристики берилла из этих месторождений. Поэтому в таблице 1 приведены, в частности, данные о содержании натрия и железа в бериллах из пегматитов

Таблица 1. Химический состав берилла

Компоненты	Содержание компонентов (в масс. %)			
	1	2	3	4
SiO ₂	65,80	59,35	63,30	63,50
Al ₂ O ₃	17,39	16,00	17,97	17,48
Fe ₂ O ₃	0	0	0,21	0,51
FeO	0,33	0,30	0,26	0,28
MnO	0	0	сл	сл
MgO	0	0	0,02	0,14
CaO	0	0	0,25	0,25
K ₂ O	0	0	сл	сл
Na ₂ O	1,95	1,47	1,61	1,68
BeO	Не опр	Не опр	12,37	12,27
Сумма	85,47	77,12	95,99	96,11

Примечание. 1 и 2 — результат микрозондового анализа, авторские данные; 3 и 4 — данные В. В. Гордиенко [4]; 3 — полупрозрачный желтовато-зелёный берилл III; 4 — полупрозрачный желтовато-зелёный берилл II.

Колмозёрского месторождения [4]. Следует отметить, что по количеству натрия бериллы из сравниваемых месторождений не различаются. Количество суммарного железа в бериллах Колмозера несколько превышает содержание этого элемента в бериллах «Большого Лаптя». Содержание щелочных элементов в последних соответствуют (в масс.%): Na_2O — от 0,76 до 1,75, Li_2O — 0,25 до 0,85, Rb_2O — от 0,013 до 0,2, Cs_2O — от 0,083 до 0,63.

Как известно, А. А. Беус выделил несколько типов бериллов, отличающихся содержанием щелочных элементов (R_2O) [5]: 1) бесщелочные бериллы с полным

Таблица 2. Содержание щелочных элементов в бериллах

Месторождение	Содержание компонентов (в масс. %)					
	Na_2O	K_2O	Li_2O	$\Sigma(\text{Na}_2\text{O}+\text{Li}_2\text{O})$	Rb_2O	Cs_2O
Большой Лапоть, Кольский п-ов (среднее)	1,41±0,29	0,20±0,08	0,63±0,07	1,84±0,25	0,060±0,020	0,230±0,060
Редкометалльные пегматиты, Колмозеро*						
Берилл II (среднее)	1,68	0,23	0,65	2,33	0,035	0,295
Берилл III (среднее)	1,58	0,29	0,68	2,26	0,036	0,350
Калба, В. Казахстан	0,98	0,27	0,251	1,23	0,0106	0,142
Забайкалье, Дурулгуй** Завитинское	0,52	0,25	0,123	0,643	0,003	0,032
Гранит-пегматиты	0,3	0,14	0,12	0,42	0,003	0,032
Альбитовые пегматиты	1,08	0,2	0,45	1,53	0,014	0,063
Сподуменовые пегматиты	1,02	0,1	0,62	1,64	0,021	0,34
Редкометалльно- слюдоносные пегматиты Слюдяной						
Бор, Карелия	0,95	0,12	1	1,95	0,032	0,265
Мамский пегматитовый пояс, (В. Сибирь) ***	0,92	0,35	0,110	1,03	0,0078	0,108
Слюдоносные пегматиты Мамский пегматитовый пояс (В. Сибирь) ***	1,48	0,52	0,183	1,663	0,0072	0,229
М-ние «Максимиха» (Мама, В. Сибирь)	0,67	0,06	0,13	0,79	0,0024	0,059

Примечание. Анализы исследованных бериллов выполнены в СПбГУ аналитиком А. Н. Ильиной.

* Результаты анализа берилла по Колмозеру (данные В. В. Гордиенко): берилл II — полупрозрачный желтовато-зелёный; берилл III — полупрозрачный желтовато-зелёный [4]; ** [8]; *** [9].

отсутствием или с очень низким содержанием щелочей (в масс. %) — $R_2O < 0,5$; 2) натровые бериллы, с содержанием Na_2O около 0,5; 3) натрово-литиевые бериллы, где Na_2O и Li_2O составляют в сумме более 1; 4) сильнощелочные (или цезиевые) бериллы, в которых сумма Cs_2O и Rb_2O более 2–3 масс. %.

В бериллах из пегматитов месторождения «Большой Лапоть» сумма натрия и лития превышает 1% и варьирует от 1,01 до 2,48% (табл. 2), поэтому они могут быть отнесены к третьему типу — натрово-литиевому. В этой же таблице приведены данные для бериллов из разных формационных типов пегматитов [6]. Так, в бериллах слюдоносных пегматитов (м-ние Максимиха, Восточная Сибирь) $\Sigma(Na_2O + Li_2O)$ равна 0,79%, в редкометалльно-слюдоносных (Слюдяной Бор, Карелия) $\Sigma(Na_2O + Li_2O) = 1,95$, в редкометалльных пегматитах Калбы (Восточный Казахстан) — $\Sigma(Na_2O + Li_2O) = 1,23$. Исследованные бериллы сопоставимы с бериллами Колмозерского месторождения, в которых $\Sigma(Na_2O + Li_2O) = 2,23–2,33$. Следует отметить, что бериллы из жилы № 7 характеризуются в среднем несколько более высокими значениями $Na_2O + Li_2O + Cs_2O$ по сравнению с бериллами Колмозера.

По результатам рентгеноструктурного анализа, параметр элементарной ячейки c_0 исследованных бериллов несколько выше c_0 бериллов Колмозерского месторождения (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3. Результаты рентгеноструктурного анализа бериллов

Месторождение, № образцов	Параметры ячейки структуры берилла			$Na_2O + Li_2O + Cs_2O$ (в масс. %)
	a_0	c_0	$c_0 : a_0$	
Большой Лапоть, Кольский п-ов: 1 2	$9,217 \pm 0,001$	$9,220 \pm 0,001$	1,000	3,355
	$9,220 \pm 0,001$	$9,218 \pm 0,001$	1,000	2,70
Редкометалльные пегматиты Колмозеро (Кольский п-ов) *: 3 (берилл II) 4 (берилл III) 5 (берилл III в ассоциации с мусковитом)	$9,211 \pm 0,002$	$9,209 \pm 0,001$	1,000	2,89
	$9,214 \pm 0,001$	$9,213 \pm 0,001$	1,000	2,94
	$9,216 \pm 0,003$	$9,210 \pm 0,001$	0,999	2,83
Калба, В. Казахстан, 6	$9,216 \pm 0,001$	$9,216 \pm 0,001$	1,000	1,65
Редкометалльно-слюдоносные пегматиты				
Слюдяной Бор, Карелия, 7	$9,220 \pm 0,001$	$9,227 \pm 0,001$	1,001	4,75
Слюдоносные пегматиты				
Максимиха, Мама, В. Сибирь, 8	$9,219 \pm 0,001$	$9,199 \pm 0,001$	0,998	0,92

Примечание. Исследования выполнены в СПбГУ под руководством В. Б. Трофимова. Условия съемки: дифрактометр ДРОН-2, скорость вращения гониометра 2 град/мин; внутренний эталон — кремний, излучение Co .

*По Колмозеру — данные В. В. Гордиенко [4].

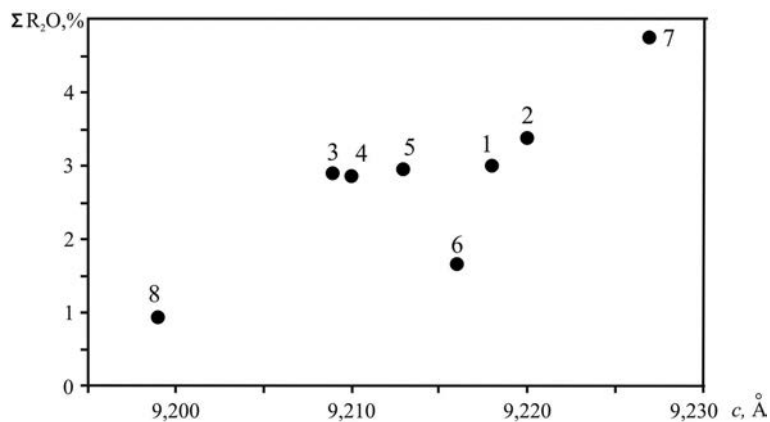


Рис. 4. Зависимость параметра c элементарной ячейки берилла от суммы содержания в нём оксидов щелочных элементов

Точки соответствуют образцам бериллов в табл. 2: 1, 2 — жила № 7 месторождения Большой Лапоть; 3, 4, 5 — Колмозеро (Кольский п-ов); 6 — Калба (Восточный Казахстан); 7 — Слюдяной Бор (Карелия); 8 — месторождение Максимиха (Восточная Сибирь).

Показатели преломления исследуемого берилла варьируют незначительно ($N_p' = 1,578 - 1,589$, $N_g' = 1,585 - 1,597$) и соответствуют цезий-содержащим бериллам [8].

Таким образом, поскольку сумма натрия и лития в бериллах из пегматитов месторождения «Большой Лапоть» превышает 1% и варьирует от 1,01 до 2,48%, они относятся к третьему типу — натрово-литиевому. По содержанию щелочных компонентов они значительно отличаются от бериллов слюдоносных пегматитов (м-ние Максимиха, В.Сибирь — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 0,79$), редкометалльно-слюдоносных (Слюдяной Бор, Карелия — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 1,95$), редкометалльных пегматитов

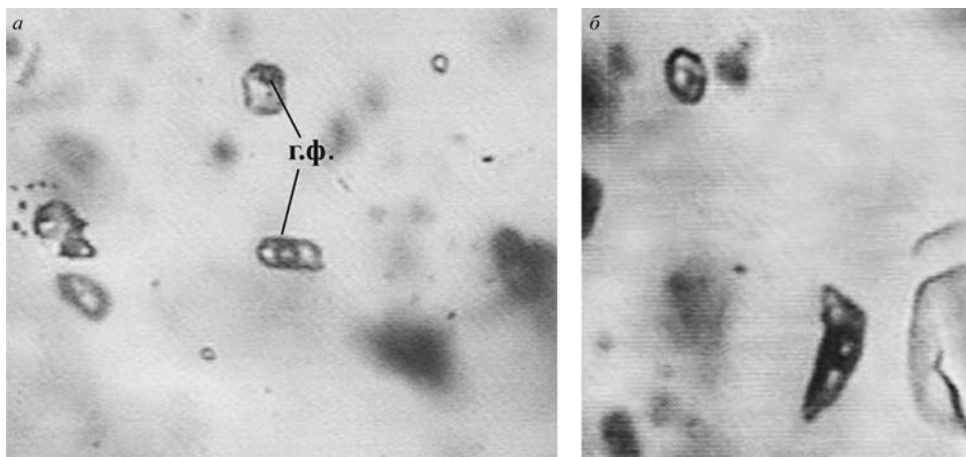


Рис. 5. Включения в берилле: а — газово-жидкие, б — многофазные включения. Размер включения 0,05–0,07 мм

Калбы (Вост. Казахстан — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 1,23$) и сопоставимы с бериллами Колмозерского месторождения, в которых $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 2,23\text{--}2,33$. По соотношению параметров элементарной ячейки ($c_0 : a_0$) они также соответствуют натрово-литиевым типу бериллов. Следует отметить, что и по содержанию цезия берилл из жилы № 7 близок к бериллам Колмозера.

Микроскопические исследования берилла позволили установить в нём различные минеральные включения, представленные апатитом, цирконом, мусковитом и гематитом в виде иголок, очень похожих на аналогичные включения в берилле из редкометальных пегматитов Индии [10].

Кроме того, в берилле присутствуют многочисленные мелкие флюидные включения размером до 0,07 мм. Среди них преобладают газовой-жидкие (рис. 5, а), реже встречаются многофазовые, содержащие несколько двупреломляющих твердых фаз, определенных как карбонаты (соотношение фаз: жидкость (ж): газ (г) : твердая фаза (тв.) — 75:20:5) (рис. 5, б). Газовая фаза состоит из CO_2 с низкой плотностью [11].

Физико-химические параметры формирования бериллсодержащей ассоциации

P-T-параметры образования берилла. Оценка температуры и давления формирования бериллсодержащей ассоциации была выполнена по различным геохимическим геотермометрам [12]: двуполевошпатовому [13–15], мусковитовому [16], мусковит-полевошпатовому [16–18], а также по гранат-турмалиновому [19]. Кроме того, наличие в берилле большого количества флюидных включений позволило использовать метод их гомогенизации.

Температура равновесного сосуществования граната и турмалина равна 415° . Она определена по геотермометру, предложенному Н. В. Владыкиным [19] и основанному на зависимости от температуры коэффициента распределения железа между этими минералами, который рассчитывается как отношение суммарного железа к сумме железа и марганца.

Средние температуры, определённые по двуполевошпатовым геотермометрам [13–15], приведены в табл. 4, и соответствуют для КПШ I 490°C , а для КПШ II — 450°C . Температура равновесного сосуществования КПШ II и мусковита соответствует 425°C , давление — 2 кбар [17, 18]. Для оценки давления использована диаграмма, построенная по данным Дж. Стормера [12, 20], характеризующая зависимость коэффициента распределения натрия (K_D^{Na}) между полевыми шпатами от температуры и давления. Согласно ей давление равно $\sim 1\text{--}2$ кбар, поскольку в области низких значений K_D^{Na} кривые, соответствующие 1 и 2 кбар, практически совпадают. Поэтому давление, соответствующее условиям образования бериллсодержащей ассоциации, лежит в интервале $1\text{--}2$ кбар.

Исследование флюидных включений в берилле позволило оценить среднюю температуру их гомогенизации. С поправкой на давление она составляет 460°C .

P-T-условия, при которых формировалась берилл — турмалин — гранатовая ассоциация, определённые на основе различных геотермометров: температура — $415\text{--}460^\circ\text{C}$ и давление $1\text{--}2$ кбар.

Таблица 4. Значения температуры формирования минеральных ассоциаций, определённые различными методами

Минералы, использованные для оценки температуры	T, °C		
	<i>По разным двуполевошпатовым геотермометрам</i>		
	по Т. Барту [13]	по И. Д. Рябчикову [14]	по В. В. Гордиенко [15]
КПШ I–Пл	480	510	490
	$T_{\text{сред.}} = 490 \pm 10$		
КПШ II–Пл	420	490	450
	$T_{\text{сред.}} = 450 \pm 20$		
<i>По мусковит-полевошпатовому геотермометру</i>			
Му –Пл 5	по Н. В. Котову и соавт. [16]		По А. С. Таланцеву [17, 18]
	450		420
	$T_{\text{сред.}} = 410 \pm 20$		
КПШ II–Му	425		
<i>По гранат-турмалиновому [19]</i>			
Гр–Гур	415		
<i>T гомогенизации включений</i>			
Берилл	460 (с поправкой на давление)		

Анализ минеральных равновесий. Для оценки физико-химических условий формирования берилла использован расчётный метод химической термодинамики [21–23]. Термодинамические константы веществ, участвующих в реакциях, взяты из справочников [23, 24] либо рассчитаны по существующим методам [22, 23, 25]. При составлении уравнений реакций были сделаны допущения, обоснованные ранее [26, 27]: все сильные основания, а также ионы магния участвуют в реакциях в виде простых ионов; железо присутствует в виде иона FeOH^+ , борная кислота — как H_3BO_3 , HF — в виде растворённой газовой фазы с фугитивностью, равной 0,1 бар.

На основе расчётов равновесий реакций, приведенных в табл. 5, оценены физико-химические условия существования бериллсодержащей ассоциации для температуры 400 °C.

Как видно из диаграммы (рис. 6, а), построенной в координатах $\lg a_{\text{FeOH}^+}$ — pH, при активности фосфорной кислоты, равной — $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 10^{-4,4}$, и активностях остальных ионов: $a_{\text{Fe}, \text{Mn}^{2+}} = 10^{-4,5}$, $a_{\text{Ca}^{2+}} = 10^{-4,8}$, $a_{\text{Na}^+} = 10^{-1}$, $a_{\text{H}_4\text{SiO}_4} = 10^{-2,8}$, $a_{\text{Be}^{2+}} = 10^{-3,5}$, $a_{\text{K}^+} = 10^{-3}$, $a_{\text{AlOH}_2^+} = 10^{-2,3}$ поле устойчивости берилла представляет собой очень узкую область в интервале значений pH от 4,1 до 4,3. Оно увеличивается с уменьшением активности железа. Незначительное уменьшение активности фосфорной кислоты (до $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 10^{-4,5}$ и далее 10^{-5}) приводит к заметному увеличению поля устойчивости берилла (рис. 6, б и в). Линия равновесия апатит-берилл сдвигается в сторону повышения pH, отвечающих в щелочной среде значениям $\text{pH} > 4,3$.

Поле устойчивости апатита со стороны более кислых сред ограничено линией равновесия апатит — гранат. Гранат существует в интервале значений pH от 4,1 до 4,3 при $\lg a_{\text{FeOH}^+} = -4,5$, и с увеличением активности железа оно существенно

Таблица 5. Уравнения реакций, характерных для пегматитов месторождения «Большой Лапоть»

Минералы	Реакции
Тур-Бер	$2\text{Na}_{0,7}\text{FeMg}_{0,1}\text{Li}_{0,6}\text{Al}_{7,3}\text{Si}_{6}\text{O}_{18,4}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{F}_{0,6} + 31,8 \text{H}_4\text{SiO}_4 + 21,9 \text{Ve}^{2+} = 7,3 \text{Ve}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18}) + 1,4 \text{Na}^+ + 0,2 \text{Mg}^{2+} + 1,2 \text{Li}^+ + 1,2 \text{HF} + 6 \text{H}_3\text{BO}_3 + 36,6 \text{H}_2\text{O} + 38,8 \text{H}^+ + 2 \text{FeOH}^+$
Тур-КПШ	$\text{Na}_{0,7}\text{FeMg}_{0,1}\text{Li}_{0,6}\text{Al}_{7,3}\text{Si}_{6}\text{O}_{18,4}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{F}_{0,6} + 7,3 \text{K}^+ + 15,9 \text{H}_4\text{SiO}_4 = 7,3 \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 0,7 \text{Na}^+ + 0,1 \text{Mg}^{2+} + 0,6 \text{Li}^+ + 0,6 \text{HF} + 3\text{H}_3\text{BO}_3 + 25,6 \text{H}_2\text{O} + 4,8 \text{H}^+ + \text{FeOH}^+$
Ап-Бер	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{FON})_2 + 2\text{AlON}^{2+} + 6 \text{H}_4\text{SiO}_4 + 3 \text{Ve}^{2+} + 10\text{H}^+ = \text{Ve}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18}) + 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{HF} + 9 \text{H}_2\text{O}$
Гр-Бер	$\text{Mg}_{0,2}\text{Fe}_{1,2}\text{Mn}_{1,6}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 3 \text{H}_4\text{SiO}_4 + 3 \text{Ve}^{2+} = \text{Ve}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18} + 1,6\text{Mn}^{2+} + 0,2 \text{Mg}^{2+} + 4,8 \text{H}_2\text{O} + 1,2 \text{H}^+ + 1,2 \text{FeOH}^+$
Гр-Тур	$7,3 \text{Mg}_{0,2}\text{Fe}_{1,2}\text{Mn}_{1,6}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 1,2\text{Li}^+ + 1,2\text{HF} + 1,4\text{Na}^+ + 1,56 \text{H}_2\text{O} + 6\text{H}_3\text{BO}_3 + 30,04\text{H}^+ = 2\text{Na}_{0,7}\text{FeMg}_{0,1}\text{Li}_{0,6}\text{Al}_{7,3}\text{Si}_{6}\text{O}_{18,4}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{F}_{0,6} + 9,9\text{H}_4\text{SiO}_4 + 1,26\text{Mg}^{2+} + 11,68\text{Mn}^{2+} + 6,76\text{FeOH}^+$
Ап-Гр	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{FON})_2 + 2\text{AlON}^{2+} + 1,2\text{FeOH}^+ + 3 \text{H}_4\text{SiO}_4 + 0,2\text{Mg}^{2+} + 1,6 \text{Mn}^{2+} + 11,2\text{H}^+ = \text{Mg}_{0,2}\text{Fe}_{1,2}\text{Mn}_{1,6}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3 + 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{HF} + 4,2 \text{H}_2\text{O}$
Гр-Аб	$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 1,2\text{FeOH}^+ + 1,6\text{Mn}^{2+} + 0,2\text{Mg}^{2+} + 6,8 \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_{0,2}\text{Fe}_{1,2}\text{Mn}_{1,6}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 2\text{Na}^+ + 3\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2,8\text{H}^+$

П р и м е ч а н и е. КПШ — калиевый полевоый шпат, Аб — альбит, Тур — турмалин, Бер — берилл, Гр — гранат, Ап — апатит.

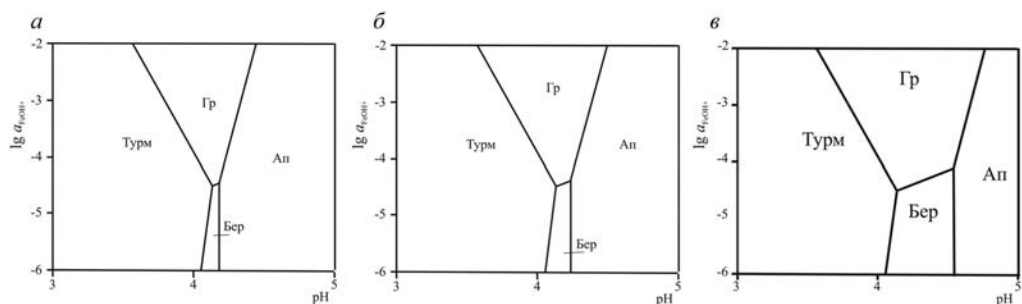


Рис. 6. Соотношение полей устойчивости турмалина, граната, апатита и берилла при $T = 400^\circ\text{C}$ и разной активности фосфорной кислоты а — $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 10^{-4,4}$, б — $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 10^{-4,5}$, в — $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 10^{-5}$

расширяется. С понижением рН среды устойчивым становится турмалин (при $\text{pH} < 4,1$). Точка равновесия турмалин-гранат-апатит-берилл отвечает $\text{pH} = 4,2$, $\lg a_{\text{H}_3\text{PO}_4} = -4,4$ и $\lg a_{\text{FeOH}^+} = -4,5$.

На диаграмме в координатах $\lg a_{\text{FeOH}^+} - \text{pH} - a_{\text{H}_4\text{SiO}_4}$ (рис. 7) показано одновременное влияние активностей железа, фосфорной кислоты и рН на соотношение областей устойчивости турмалина, апатита, берилла и граната.

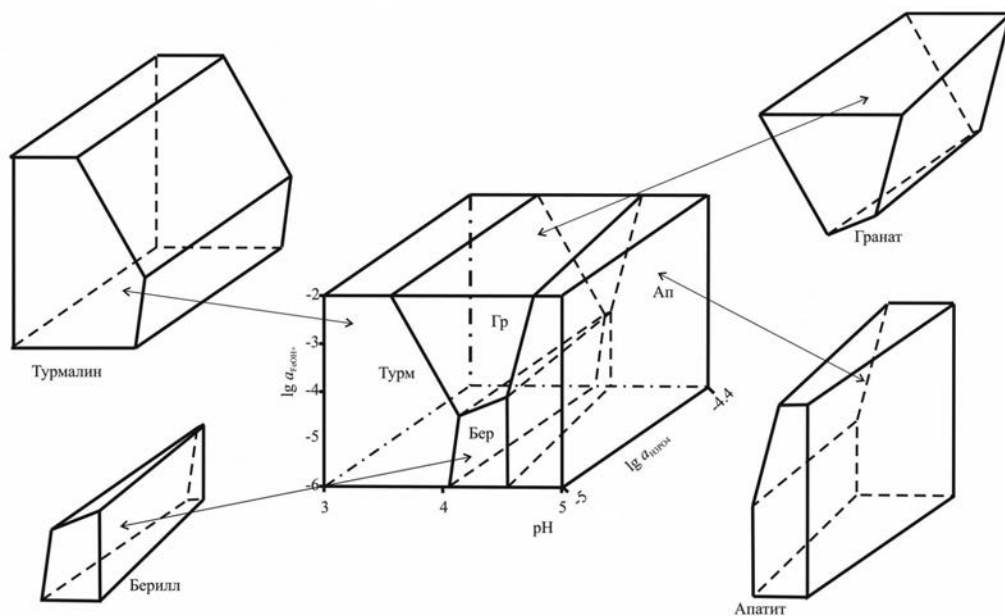


Рис. 7. Влияние изменения активностей железа, фосфорной кислоты и рН на соотношение областей устойчивости турмалина, апатита, берилла и граната при $T = 400^\circ\text{C}$ и следующих активностях ионов: $a_{\text{Mn}^{2+}} = 10^{-4,5}$, $a_{\text{Ca}^{2+}} = 10^{-4,8}$, $a_{\text{Na}^+} = 10^{-1}$, $a_{\text{H}_4\text{SiO}_4} = 10^{-2,8}$, $a_{\text{Be}^{2+}} = 10^{-3,5}$, $a_{\text{K}^+} = 10^{-3}$, $a_{\text{AlOH}^{2+}} = 10^{-2,3}$

Таким образом, растворы, участвующие в формировании берилла в пегматитах, были слабокислыми, величина рН варьировала в интервале 4–4,2 при следующих активностях ионов: $a_{\text{Fe}, \text{Mn}^{2+}} = 10^{-4,5}$, $a_{\text{Ca}^{2+}} = 10^{-4,8}$, $a_{\text{Na}^+} = 10^{-1}$, $a_{\text{H}_4\text{SiO}_4} = 10^{-2,8}$, $a_{\text{Be}^{2+}} = 10^{-3,5}$, $a_{\text{K}^+} = 10^{-3}$, $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} \leq 10^{-4,4}$, $a_{\text{AlOH}^{2+}} = 10^{-2,3}$.

Выводы

В результате проведенных исследований по жиле № 7 месторождения «Большой Лапоть» были детально изучены минералы, сопутствующие бериллу и слагающие альбитовые замещающие комплексы, образующиеся путем метасоматического замещения ранее сформированных кварц-полевошпатовых парагенезисов.

Изученный берилл относится к натрово-литиевому типу (к третьему), поскольку сумма натрия и лития в них превышает 1% и достигает 2,48%. По содержанию щелочных компонентов минерал из пегматитов «Большого Лаптя» существенно отличается от бериллов слюдоносных пегматитов (м-ние Максимиха, В. Сибирь) — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 0,79$, редкометалльно-слюдоносных (Слюдяной Бор, Карелия — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 1,95$; Мамского пегматитового пояса — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 1,03$), редкометалльных пегматитов Калбы (В. Казахстан — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 1,23$); Забайкалья (Завитинское: альбитовые пегматиты — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 1,53$ и сподуменовые пегматиты — $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 1,64$) и сопоставим с бериллом Колмозерского месторождения, в котором $\Sigma(\text{Na}_2\text{O} + \text{Li}_2\text{O}) = 2,23\text{--}2,33$. По содержанию рубидия и цезия он также наиболее близок к бериллу Колмозера.

Применение различных геотермобарометров, а также исследование флюидных включений в берилле позволило оценить температуру и давление формирования бериллсодержащей ассоциации: $T = 415\text{--}460$ °С, $P = 1\text{--}2$ кбар, что согласуется с результатами исследования ставролита в редкометалльных пегматитах Колмозера, позволивших оценить давление в них: $P \sim 1,8\text{--}1,4$ кбар [28, 29].

На основе расчетных методов химической термодинамики оценены активности ионов в минералообразующей среде, формирующей бериллсодержащую ассоциацию: $a_{\text{FeOH}} = 10^{-4,5}$, $a_{\text{H}_3\text{PO}_4} \leq 10^{-4,4}$, $a_{\text{AlOH}} = 10^{-2,3}$, $a_{\text{Ca}^{2+}} = 10^{-4,8}$, $a_{\text{Na}^+} = 10^{-1}$, $a_{\text{H}_4\text{SiO}_4} = 10^{-2,8}$, $a_{\text{Be}^{2+}} = 10^{-3,5}$, $a_{\text{K}^+} = 10^{-3}$ при $\text{pH} = 4,2$.

Литература

1. Антонюк Е. С. Структурно-минеральные комплексы гранитных пегматитовых жил // Материалы по минералогии Кольского полуострова. Изд-во Кольск. фил. АН СССР, Апатиты. 1962. Вып. 3. С. 134–142.
2. Антонюк Е. С. Некоторые особенности пространственного распределения типов пегматитовых жил в одном из пегматитовых полей С-3 части Кольского полуострова // Материалы по минералогии Кольского полуострова. Изд-во Кольск. фил. АН СССР, Апатиты. 1968. Вып. 6. С. 153–161.
3. Антонюк Е. С. Геология и геохимия гранитных пегматитов района озера Большой Лапоть. Л.: Недра. 1976. 237 с.
4. Гордиенко В. В. Минералогия, геохимия и генезис сподуменовых пегматитов. Л.: Недра, 1970. 238 с.
5. Беус А. А. О зависимости между содержанием лития, натрия и цезия в щелочных бериллах // Геохимия. 1959. № 8. С. 555–571.
6. Гордиенко В. В. Гранитные пегматиты. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 271 с.
7. Фекличев В. Г. Берилл. М.: Наука, 1964. 160 с. 183 с.
8. Гранитные пегматиты / под ред. Б. М. Шмакина. Т. 2. Редкометалльные пегматиты. Новосибирск, 1997. 282 с.
9. Гранитные пегматиты / под ред. В. Н. Собаченко, Б. М. Шмакина. Т. 1. Слюдоносные пегматиты. Новосибирск, 1990. 232 с.
10. Win W. L. Large cat's-eye beryl from India/Gem & Gemology, 2009. Vol. 45, N 4. P. 297–298.
11. Типоморфные особенности включений в берилле / Пономарева Н. И., Елфимова Е. В., Мейксина Ю. Л., Мельникова Н. Г. и др. // Вопросы геохимии и типоморфизма минералов. 2008. № 6. С. 154–162.

12. Пономарева Н. И. Оценка P-T-параметров процессов минералообразования на основе геотермобарометров: методическое пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2014. 40 с.
13. Барт Т. Ф. Измерения палеотемператур гранитных пород. М.: Наука, 1962. 19 с.
14. Рябчиков И. Д. Усовершенствование полевошпатового геологического термометра Барта // Минералогическая термометрия и барометрия / под. ред. В. И. Смирнова, Н. П. Ермакова, Ю. А. Долгова и др. М.: Наука, 1965. С. 49–60.
15. Слюдоносные пегматиты Северной Карелии (геология, минералогия, геохимия и генезис) / под ред. В. В. Гордиенко и В. А. Леоновой. Л.: Недра, 1976. 367 с.
16. Котов Н. В., Милькевич Р. И., Турченко С. И. Палеотермометрия мусковитсодержащих метаморфических пород по данным рентгеновского и химического изучения мусковитов // Докл. АН СССР. 1969. Т. 184. № 5. С. 1180–1182.
17. Таланцев А. С. Плагноклаз-мусковитовый геологический термометр. ДАН СССР. 1971. Т. 196. № 5. С. 1123–1195.
18. Таланцев А. С. Геотермобарометрия по парагенетической ассоциации калишпат + мусковит + альбит // Ежегодник Уральского научного центра АН СССР. Свердловск, 1971. С. 125–127.
19. Владыкин Н. В. Минералого-геохимические особенности редкометалльных гранитоидов Монголии. Новосибирск, 1983. 200 с.
20. Stormer J. C. A Practical two-feldspar Geothermometer. Amer. Miner. 1975. Vol. 60, N 7–8. P. 667–674.
21. Булах А. Г., Кривовичев В. Г. Расчет минеральных равновесий. Л., 1985. 183 с.
22. Говоров И. Н. Термодинамика ионно-минеральных равновесий и минералогия гидротермальных месторождений. М., 1977. 239 с.
23. Наумов Г. Б., Рыженко Б. Н., Ходаковский И. Л. Справочник термодинамических величин (для геологов). М.: Атомиздат, 1971. 210 с.
24. Robie R. A., Hemingway B. S. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and Bar (10^5 Pascals) Pressure and at Higher Temperatures // Geol. Surv. Bull. Washington, 1995. 462 p.
25. Ермолаев М. М. Вычисление значений свободных энергий некоторых гипергенных минералов на основе предположения о стационарности химических потенциалов и концентраций главных элементов в водах Мирового океана // Миграция химических элементов при процессах выветривания (по экспериментальным данным). М.: Наука, 1966. С. 13–65.
26. Пономарева Н. И., Гордиенко В. В. Физико-химические условия образования лепидолита // Зап. Всесоюз. минер. общ-ва. 1991. Ч. 120, вып. 5. С. 31–39.
27. Пономарева Н. И., Кривовичев В. Г. Минеральные равновесия в гранитных пегматитах на постагматическом этапе. СПб., 2004. 142 с.
28. Гордиенко В. В., Пономарева Н. И., Крецер Ю. Л. О ставролите и сопутствующих минералах из редкометалльных гранитных пегматитов // Зап. Российского минер. общ-ва. 2011. Ч. 140, вып. 4. С. 92–106.
29. Gordienko V. V., Ponomareva N. I., Kretser Yu. L. Staurolite and associated minerals from rare-metal granite pegmatites // Geology of Ore Deposits. 2012. Vol. 54, N 8. P. 676–687.

References

1. Antonyuk E. S. [Structural-mineral associations of granite pegmatite lodes]. *Materialy po mineralogii Kol'skogo poluostrova [Kola peninsula mineralogy data]*. Kola Branch of the USSR AS press. Apatity, 1968, issue 3, pp. 134–142. (In Russian)
2. Antonyuk E. S. [Some peculiarities of pegmatite load types spatial distribution in one of pegmatite fields of C-3 Kola peninsula part]. *Materialy po mineralogii Kol'skogo poluostrova [Kola peninsula mineralogy data]*. Kola Branch of the USSR AS press. Apatity, 1968, issue 6, pp. 153–161. (In Russian)
3. Antonyuk E. S. *Geologiya i geokhimiya granitnykh pegmatitov raiona ozera Bol'shoi lapot' [Granite pegmatites geology and geochemistry of Bol'shoi Lapot' lake area]*. Leningrad, Nedra Publ., 1976. 237 p. (In Russian)
4. Gordienko V. V. *Mineralogiya, geokhimiya i genesis spodumenovykh pegmatitov [Spodumene pegmatites mineralogy, geochemistry, and genesis]*. Leningrad, Nedra Publ., 1970. 238 p. (In Russian)
5. Beus A. A. O zavisimosti mezhdru sodержaniem litiia, natriia i tsezia v shchelochnykh berillakh [About dependence of lithium, sodium, and cesium contents in alkaline beryl]. *Geokhimiya [Geochemistry]*, 1959, no. 8, pp. 555–571. (In Russian)

6. Gordienko V.V. *Granitnye pegmatity* [Granite pegmatites]. St. Petersburg, St.-Petersburg University Press, 1996, 271 p. (In Russian)
7. Feklichev V.G. *Berill* [Beryl]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 160 p. 183 p. (In Russian)
8. *Granitnye pegmatity* [Granite pegmatites]. Ed. by B.M. Shmakin. Vol. 2. Redkometal'nye pegmatity [Rare-metal pegmatites]. Novosibirsk, 1997. 282 p. (In Russian)
9. *Granitnye pegmatity* [Granite pegmatites]. Ed. by V.N. Sobachenko, B.M. Shmakina. Vol. 1. Sliudonosnye pegmatity [Mica-bearing pegmatites]. Novosibirsk, 1990. 232 p. (In Russian)
10. Win W.L. Large cat's-eye beryl from India. *Gem & Gemology*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 297–298.
11. Ponomareva N. I., Elfimova E. V., Meiksina Yu. L., Mel'nikova N. G., Mikhailova A. V., Shevtsova E. V. Tipomorfnye osobennosti vkluchenii v berille [Typomorphic peculiarities of beryl inclusions]. *Voprosy geokhimii i tipomorfizm mineralov* [Geochemistry matters and typomorphism of minerals], 2008, no. 6, pp. 154–162. (In Russian)
12. Ponomareva N.I. Otsenka P-T-parametrov protsessov mineraloobrazovaniia na osnove geotermobarometrov [Estimation P-T-parameters mineral formation on the basis of geothermobarometers]. *Metodicheskoe posobie* [Methodical manual]. St. Petersburg, St.-Petersburg University Press, 2014. 40 p. (In Russian)
13. Bart T. F. *Izmereniia paleotemperatur granitnykh porod* [Granite rocks paleotemperature measurement]. Moscow, Nauka Publ., 1962. 19 p. (In Russian)
14. Ryabchikov I.D. Uovershenstvovanie polevoshpatovogo geologicheskogo termometra Barta [Development of feldspar geological Bart's thermometer]. *Mineralogicheskaiia termometriia i barometriia* [Mineralogical thermometry and barometry]. Ed. by V.I. Smirnov, N.P. Ermakov, Yu. A. Dolgov and oth. Moscow, Nauka Publ., 1965, pp. 49–60. (In Russian)
15. *Sliudonosnye pegmatity Severnoi Karelii (geologiia, mineralogiia, geokhimiiia i genesis)* [North Karelia mica-bearing pegmatites (geology, mineralogy, geochemistry, and genesis)]. Ed. by V.V. Gordienko and V.A. Leonova. Leningrad, Nedra Publ., 1976. 367 p. (In Russian)
16. Kotov N. V., Mil'kevich R. I., Turchenko S. I. Paleotermometriia muskovitsoderzhashchikh metamorficheskikh porod po dannym rentgenovskogo i khimicheskogo izucheniia muskovitov [Paleothermometry of muscovite-containing metamorphic rocks by x-ray and chemical study of muscovites]. *Dokl. AN SSSR* [Reports of USSR AS], 1969, vol. 184, no. 5, pp. 1180–1182. (In Russian)
17. Talantsev A. S. Plagioklaz-muskovitovyi geologicheskii termometr [Plagioclase-muscovite geological thermometer]. *DAN SSSR* [Reports of USSR AS], 1971a, vol. 196, no. 5, pp. 1193–1195. (In Russian)
18. Talantsev A. S. Geotermobarometriia po parageneticheskoi assotsiatsii kalishpat + muskovit + al'bit [Geothermobarometry by paragenetic association microcline + muscovite + albite]. *Ezhegodnik Ural'skogo nauchnogo tsentra ANSSSR* [Yearbook of Ural science center USSR AS]. Sverdlovsk, 1971b, pp. 125–127. (In Russian)
19. Vladykin N. V. *Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti redkometal'nykh granitoidov Mongolii* [Mineralogical-geochemical peculiarities of rare-metal granitoids from Mongolia]. Novosibirsk, 1983. 200 p. (In Russian)
20. Stormer J. C. A Practical two-feldspar Geothermometer. *Amer. Miner.*, 1975, vol. 60, no. 7–8, pp. 667–674.
21. Bulakh A. G., Krivovichev V. G. . *Raschet mineral'nykh ravnoves* [Mineral equilibrium calculations]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 183 p. (In Riussia)
22. Govorov I. N. *Termodinamika ionno-mineral'nykh ravnovesii i mineralogiia gidrotermal'nykh mesotorozhdeniit* [Ion-mineral equilibrium thermodynamics and mineralogy of hydrothermal deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 239 p. (In Russian)
23. Naumov G. B., Ryzhenko B. N., Khodakovskiy I. L. *Spravochnik termodinamicheskikh velichin (dliia geologov)* [Handbook of thermodynamical parameters (for geologists)]. Moscow, Atomizdat Publ., 1971. 210 p.
24. Robie R. A., Hemingway B. S. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and Bar (10⁵ Pascals) Pressure and at Higher Temperatures. *Geol. Surv. Bull.* Washington, 1995. 462 p.
25. Ermolaev M. M. Vychislenie znachenii svobodnykh energii nekotorykh gipergennykh mineralov na osnove predpolozheniia o statsionarnostikhimicheskikh potentsialov i kontsentratsii glavnykh elementov v vodakh Mirovogo Okeana [Free energy calculation of some minerals on the basis of assumption about stability of chemical potentials and concentrations of main elements in global ocean water]. *Migratsiia khimicheskikh elementov pri protsessakh vyvetriviianiia (po eksperimental'nykh dannym)* [Chemical elements migration by weathering (according to experimental data)]. Moscow, Nauka Publ., 1966. pp. 13–65. (In Russian)
26. Ponomareva N. I., Gordienko V. V. Fiziko-khimicheskie usloviia obrazovaniia lepidolita [Physical and chemical conditions of lepidolite formation]. *Zap. Vsesoiuz. miner. obshch-va* [Proceedings of all-USSR Mineralogical Society], 1991, part 120, issue 5, pp. 31–39. (In Russian)

27. Ponomareva N. I., Krivovichev V. G. *Mineral'nye ravnovesiia v granitnykh pegmatitakh na postmagmaticheskom etape*. [Mineral equilibriums in granite pegmatites during postmagmatic stage]. St. Petersburg, St.-Petersburg University Press, 2004, 142 p. (In Russian)

28. Gordienko V. V., Ponomareva N. I., Kretser Yu. L. О staurolite i sopushtvuiushchikh mineralakh iz redkometal'nykh granitnykh pegmatitov [Staurolite and associated minerals from rare-metal granite pegmatites]. *Zap. Rossiiskogo miner. obshch-va* [Proceedings of all-USSR Mineralogical Society], 2011, part 140, issue 4, pp. 92–106. (In Russian)

29. Gordienko V. V., Ponomareva N. I., Kretser Yu. L. Staurolite and associated minerals from rare-metal granite pegmatites. *Geology of Ore Deposits*, 2012, vol. 54, no. 8, pp. 676–687.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2014г.

Контактная информация:

Пономарева Наталья Игоревна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент;

n_ponomareva@mail.ru

Шурекова Надежда Сергеевна — магистр; nadezhdshu@gmail.com

Ponomareva N. I. — Candidate of Geological and Mineralogical, Associate Professor;

n_ponomareva@mail.ru

Shurekova N. S. — magistr; nadezhdshu@gmail.com