

УДК 552.16

© В. А. КАМЗОЛКИН,\* С. Д. ИВАНОВ,\* А. Н. КОНИЛОВ\*\*,\*\*\*

## ЭМПИРИЧЕСКИЙ ФЕНГИТОВЫЙ ГЕОБАРОМЕТР: ОБОСНОВАНИЕ, КАЛИБРОВКА И ПРИМЕНЕНИЕ

\* Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,  
123995, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1;  
e-mail: vkatzolkin@gmail.com

\*\* Институт экспериментальной минералогии РАН,  
142432, Черноголовка, ул. Акад. Осипьяна, д. 4

\*\*\* Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжеский пер., д. 7

Протестированы фенгитовые геобарометры Масона—Шрайера и Каддика—Томпсона с использованием большого массива данных по составам природных и синтезированных фенгитов с известными условиями формирования. Выделены три группы фенгитов: 1 — Si 3.0—3.25 к.ф., 2 — Si > 3.25,  $T < 750$  °C, 3 — Si > 3.25,  $T > 750$  °C. Для двух первых групп выведены новые уравнения геобарометра. Использование этих уравнений для изучения гнейсов и сланцев Блыбского метаморфического комплекса Северного Кавказа показало, что пиковое давление при метаморфизме достигало 2—2.2 ГПа.

*Ключевые слова:* фенгитовый геобарометр, Северный Кавказ, блыбский метаморфический комплекс.

## V. A. KAMZOLKIN, S. D. IVANOV, A. N. KONILOV. EMPIRICAL PHENGITIC GEOBAROMETER: SUBSTANTIATION, CALIBRATION AND PRACTICAL APPLICATION

\* *Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS*

\*\* *Institute of Experimental Mineralogy, RAS*

\*\*\* *Geological Institute, RAS*

Phengite is a wide spread metamorphic mineral, which is stable in wide pressure range. Dependence of pressure on silicon content that was established in the middle of 20th century enabled us to consider the phengite based geobarometer. Recently phengite geobarometer was calibrated by Caddik and Thompson but for a limited range of pressure, however there are some attempts to extend its range. We have analyzed the large number of datasets on phengite composition published by different authors. Data under consideration included both natural and experimental specimens of well defined *PT*-condition. For moderate temperature ( $T < 750$  °C) two groups of phengite can be marked. Groups are separated by silicon content value 3.25 p.f.u. Different geobarometer equations were suggested for both groups. Accuracies of these geobarometers are  $\pm 0.34$  GPa and  $\pm 0.56$  GPa, respectively. There is no evidence of using phengite as geobarometer at high temperature ( $T > 750$  °C). Derived dependences were applied to study conditions of the gneisse and schist metamorphism of Blyb metamorphic complex at the North Caucasus. This study shows that pressure peak of gneisse and schist metamorphism is 2.0—2.2  $\pm 0.4$  GPa. The latter agrees with previous works on the Blyb metamorphic complex eclogite data.

*Key words:* mineral geobarometry, phengite, petrology, the Caucasus, Blyb metamorphic complex.

## ВВЕДЕНИЕ

Минеральная геобарометрия играет важную роль в изучении условий формирования и метаморфизма горных пород. Она использует набор ассоциаций минералов — геобарометров, различных по составу, условиям образования и полям стабильности. При этом важным условием получения адекватных оценок давления при формировании породы является равновесное состояние минералов в породе (Fonarev et al., 1991). Для глубокометаморфизованных комплексов часто фиксируется многоактное проявление метаморфических процессов [Кокчетавский массив, Казахстан; террейн Сулу, Восточный Китай (Auzanneau et al., 2010), блыбский комплекс Северного Кавказа (Somín, 2011)], затрудняющее выделение равновесных минеральных ассоциаций в породе. В этом случае полезным инструментом для оценки пиковых условий метаморфизма выступает мономинеральная геобарометрия.

Одним из наиболее распространенных минералов, устойчивых в широком диапазоне давлений, является фенгит  $K(Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$ , минерал группы белых слюд, обогащенный кремнием и являющийся твердым раствором ряда мусковит-селадонит (Tischendorf et al., 2007). Изоморфные замещения, происходящие в этом ряду, сводятся к обмену Чермака:  $(Mg, Fe^{2+})+Si \leftrightarrow Al^{IV}+Al^{VI}$  (Miyashiro, Shido, 1985). Кроме того, в фенгите может быть проявлен и ограниченный изоморфизм  $Na \leftrightarrow K$ , характерный для всех белых слюд.

В начале 1960-х У. Эрнст впервые предположил прямую зависимость между содержанием селадонитового компонента в белой слюде и давлением при региональном метаморфизме (Ernst, 1963). Это предположение было экспериментально подтверждено Б. Вэлде (Velde, 1965), который впервые синтезировал фенгит в лабораторных условиях и изучил зависимость поля стабильности мусковит-селадонитового твердого раствора от температуры и давления, рассматривая фенгит как потенциальный геобарометр. Р. Пауэлл и Г. Эванс использовали экспериментальные данные Б. Вэлде для вывода геобарометра (Powell, Evans, 1983).

Х. Массон и В. Шрайер экспериментально изучили зависимость между содержанием Si в фенгите и  $P-T$  условиями в модельной системе KMASH ( $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ) (Massonne, Schreyer, 1987). Формула данного барометра по приведенным в работе изоплетам:

$$P [\text{ГПа}] = \frac{23.76 Si_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + 0.01096 T [^\circ\text{C}] - 75.34}{10}. \quad (1)$$

Для системы KFASH ( $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ) аналогичное исследование было проведено Х. Массоном и З. Шпуркой (Massonne, Szpurka, 1997).

В 2008 году М. Каддик и А. Томпсон (Caddick, Thompson, 2008) вывели формулу фенгитового геобарометра, используя модель фенгита по Р. Когану и Т. Холланду (Coggon, Holland, 2002), а также полученные с помощью *Perplex* для «среднего» пелита расчетные данные по фенгиту ( $Si$  3.0—3.8 к.ф.,  $P = 0-3.0$  ГПа). Формула имеет вид:

$$P [\text{ГПа}] = 4.19 Si_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + 0.0036 (T [^\circ\text{C}] + 273.15) - 15.15. \quad (2)$$

Для повышения точности в формулу было введено дополнительное слагаемое, учитывающее содержание Mg в слюде, которое в процессе обмена Чермака возрастает одновременно с содержанием кремния:

$$P \text{ [ГПа]} = 8.35 \text{ Mg}_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} - 1.72 \text{ Si}_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + 0.0015 (T \text{ [}^\circ\text{C]} + 273.15) + 4.59. \quad (3)$$

Для проверки возможности использования фенгитового геобарометра в природных системах было проведено его тестирование с использованием большого объема экспериментальных и природных данных.

### ОБЗОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Данные для 491 природного образца были взяты из обобщающей работы Д. Чамберса и М. Кона (Chambers, Kohn, 2012). Источником экспериментальных данных по 156 фенгитсодержащим образцам стали еще 13 публикаций: Pawley, Holloway, 1993; Domanik, Holloway, 1996, 2000; Johnson, Plank, 1999; Hermann, Green, 2001; Buick et al., 2004; Forneris, Holloway, 2004; Hermann, Spandler, 2008; Auzanneau et al., 2010; Ota et al., 2008; Tomsen, Schmidt 2008; Grassi, Schmidt, 2011a, 2011b. Общее число использованных анализов составило 648.

Диапазон изменения содержания Si в фенгите из природных образцов равен 3.0—3.7 к.ф., давление и температура, при которых сформировались эти образцы, изменяются в пределах 0.08—8 ГПа и 320—1050 °C соответственно. Те же параметры для синтезированного фенгита: Si 3.00—3.782 к.ф., давление 0.3—10 ГПа (а также 9 образцов с  $P > 10$  ГПа), температура 450—1089 °C (рис. 1).

Рост содержания кремния в изученном фенгите обнаруживает сильную зависимость от давления и незначительную — от температуры. С ростом со-

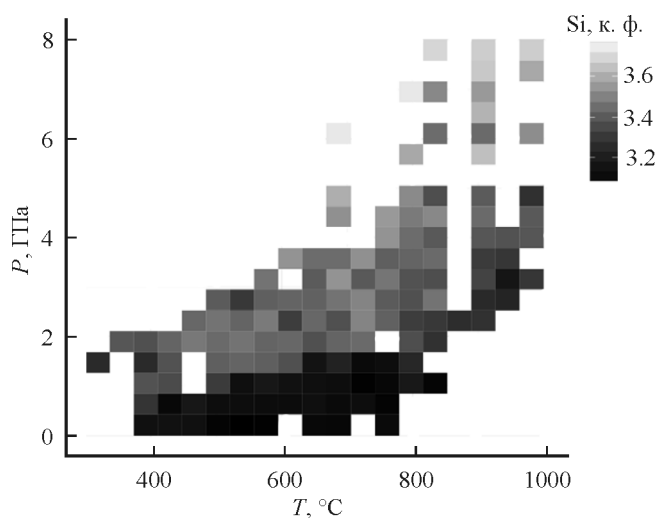


Рис. 1. Вариации содержания Si в изученном фенгите на  $P$ — $T$  диаграмме.

Fig. 1. Variations of the silicon content in the used data on phengite composition on the  $P$ — $T$  diagram. The cell grey color intensity corresponds to the average Si content (a. p. fu).

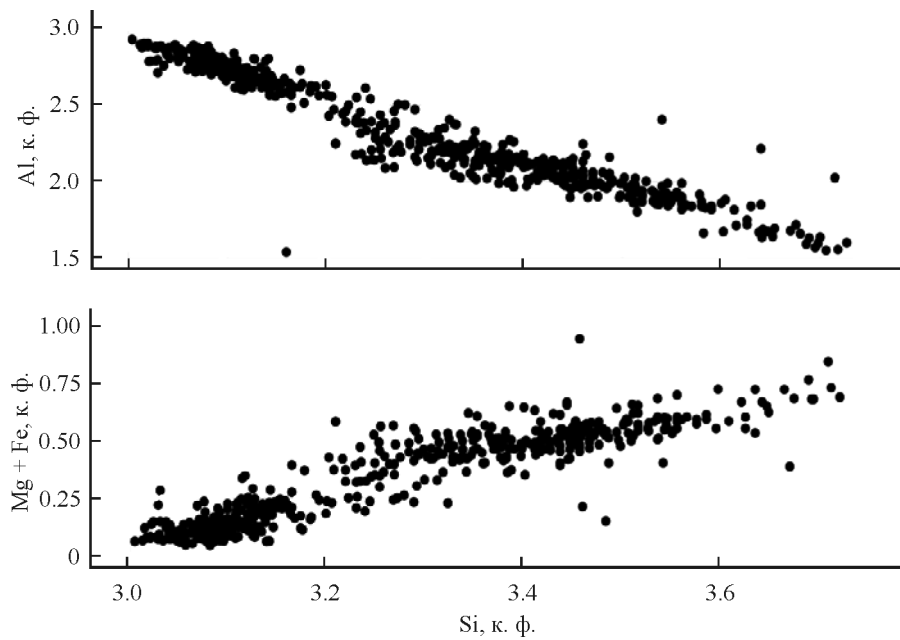


Рис. 2. Зависимости содержания  $Al_{\Sigma}$  и суммы содержаний (Mg + Fe) от содержания Si в изученных фенгитах

Fig. 2. Plots of  $Al_{tot}$  and (Mg + Fe) contents vs the Si content (a. p. fu).

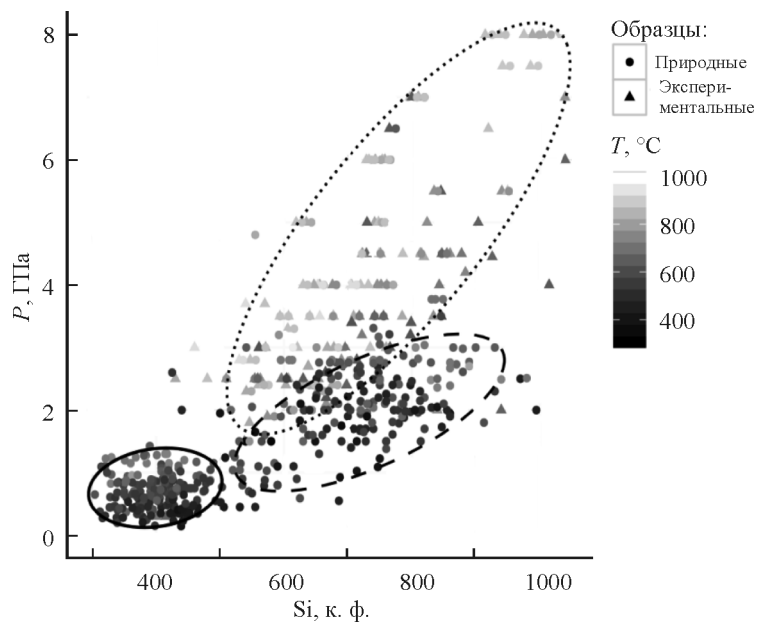


Рис. 3. Зависимость содержания Si от давления в изученных образцах.

Выделены группы анализов для которых  $Si < 3.2$  к. ф. (сплошной эллипс),  $Si > 3.2$  к. ф.,  $T < 750$  °C (пунктирный эллипс),  $T > 750$  °C (точечный эллипс).

Fig. 3. Plot of pressure (GPa) vs the Si content (apfu) in specimens. Three groups: 1) *continuous ellipse* —  $Si < 3.2$  a. p. fu); 2) *dashed ellipse*  $Si > 3.2$ ,  $T < 750$  °C; 3) *dotted ellipse* —  $T > 750$  °C.

Таблица 1

## Минеральные ассоциации, включающие изученные фенгиты

## Content of mineral phases in groups

Группа	Ky	Grt	Rt	Ph	Omp	Qtz	Amp	And	Ank	Bt	Cal	Coe	Crd
1	++	++	++	++		++	+	+	++	++	++		+
2	++	++	++	++	++	++	++					++	
3	++	++	++	++	++					+(Экс)		++	
Группа	Glm	Ilm		Gr	Lws	Pg	Pl	Sill	St	Tur	Ttn	Zo	Ep
1		++		+			++	++	++	++	+		+
2	++				+	++	+			+	+	++	++
3	+									+(Экс)		++(Экс)	

Примечание. Сокращения минералов приведены в соответствии с работой (Whitney, Evans 2010). Частоты встречаемости минералов: + — менее 15, ++ — более 15. Экс — только экспериментальные данные.

держания Si суммарное содержание Fe и Mg увеличивается, Al — снижается, что соответствует обмену Чермака (рис. 2).

При более детальном анализе зависимости содержания кремния от давления проявляется неоднородность массива данных, выраженная в существовании трех групп анализов (рис. 3). Первая группа с содержанием Si 3.0—3.25 к.ф. и отношением Si/Al < 1.3 характеризуется наибольшей кучностью в расположении фигуративных точек на графике, которые попадают в диапазон давлений 1—1.5 ГПа (рис. 3, *сплошной эллипс*). Точки, слагающие вторую группу, лежат в диапазоне Si 3.25 и P = 1.5—3.5 ГПа при отношении Si/Al > 1.3 (рис. 3, *пунктирный эллипс*). Первая и вторая группы лежат в области T < 750 °С, что позволяет отделить их от точек третьей группы (T > 750 °С, P > 1.5 ГПа) (рис. 3, *точечный эллипс*).

Более 80 % фенгитов, полученных в экспериментах, попадают в третью группу, тогда как в первой и второй группах преобладают природные образцы. Распределение последних бимодально: две изолированные группы точек (рис. 3, *сплошной и пунктирный эллипсы*) разделены областью нестабильных составов с содержанием Si 3.25 к.ф. Подобная закономерность отмечалась Б. Эвансом и Б. Патриком в работе, посвященной фенгитам ортогнейсов полуострова Сьюард, Аляска (Evans, Patrick, 1987).

## АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ

Изучение минеральных фаз, устойчивых в пределах трех выделенных групп, проводилось для 472 образцов. Из всего массива данных были отображены публикации с указанием равновесной минеральной ассоциации, включающей фенгит. Анализировалось присутствие/отсутствие в каждой из трех групп 26 распространенных минеральных фаз (табл. 1).

Ассоциация грана—кианит—фенгит—рутил—кварц (для высоких давлений — коэсит) присутствует во всех трех группах. Только для первой группы характерны ставролит, силлиманит, андалузит, кордиерит, ильменит, графит, кальцит и анкерит. Сосуществование кианита и силлиманита в пределах пер-

вой группы и полное отсутствие последнего во второй группе может свидетельствовать о том, что переход между ними протекает по границе Si1—Ky.

Только во второй группе встречаются лавсонит и парагонит. И в первой и во второй группах распространены биотит, плагиоклаз, титанит, турмалин и амфибол. Совместными минералами для второй и третьей групп являются глаукофан и коэсит — стабильные при высоких давлениях. Также в третьей группе, исключительно в экспериментальных образцах, встречаются биотит, турмалин и цоизит.

### КАЛИБРОВКА ГЕОБАРОМЕТРА

Зависимость давления от содержания кремния в фенгите и температуры представлена в работе Х. Массона и В. Шрайера графически и может быть записана в виде уравнения (1). Выражения для расчета давления, сформулированные М. Каддиком и А. Томпсоном, имеют вид линейной функции, аргументами которой служат температура и содержание Si (2), а также Mg (3) в фенгите. Формула (3) показала высокую погрешность, порядка 1 ГПа, поэтому для сравнения было выбрано выражение (2).

Оценки давления, полученные с использованием зависимости (1) для всего массива данных, оказались слабо заниженными для первой группы (в среднем на 0.15 ГПа) и сильно заниженными для второй группы (до 1 ГПа) (рис. 4, а). Для первой группы стандартная погрешность равна 0.4 ГПа, а для второй — 0.7 ГПа при 95%-ной доверительной вероятности.

Уравнение (2) дает оценки давления, завышенные в среднем на 0.25 ГПа (рис. 4, б), характеризующиеся стандартной погрешностью 0.45 ГПа для первой группы и 0.62 ГПа для второй при 95%-ной доверительной вероятности. Для третьей группы, при  $P > 3.5$  ГПа, ошибка существенно выше.

С учетом смещенности рассматриваемых оценок и наличия трех различающихся групп анализов фенгита были выведены уравнения, характеризующие зависимость давления от температуры и состава слюды для каждой из групп по отдельности.

Для первой группы ( $Si < 3.25$  к.ф.) методом множественной регрессии данных было получено уравнение:

$$P \text{ [ГПа]} = \frac{0.0237T [^\circ\text{C}] + 5.99 Si_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + 1.76 Al_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + 12.89 (Mg_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + Fe_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}}) - 3191}{10}. \quad (4)$$

Стандартная погрешность оценок давления, полученных с помощью этого уравнения для 241 анализов, составляет 0.34 ГПа при 95%-ной доверительной вероятности. При этом максимальные оценки не превышают 1.5 ГПа.

Для второй группы, отвечающей условиям  $Si > 3.25$  к.ф. и  $T < 750$  °C, было получено следующее уравнение:

$$P \text{ [ГПа]} = \frac{0.037T [^\circ\text{C}] + 19.21 Si_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} - 2.91 Al_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + 2.17 (Mg_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}} + Fe_{\text{Phe}}^{\text{к.ф.}}) - 5722}{10}. \quad (5)$$

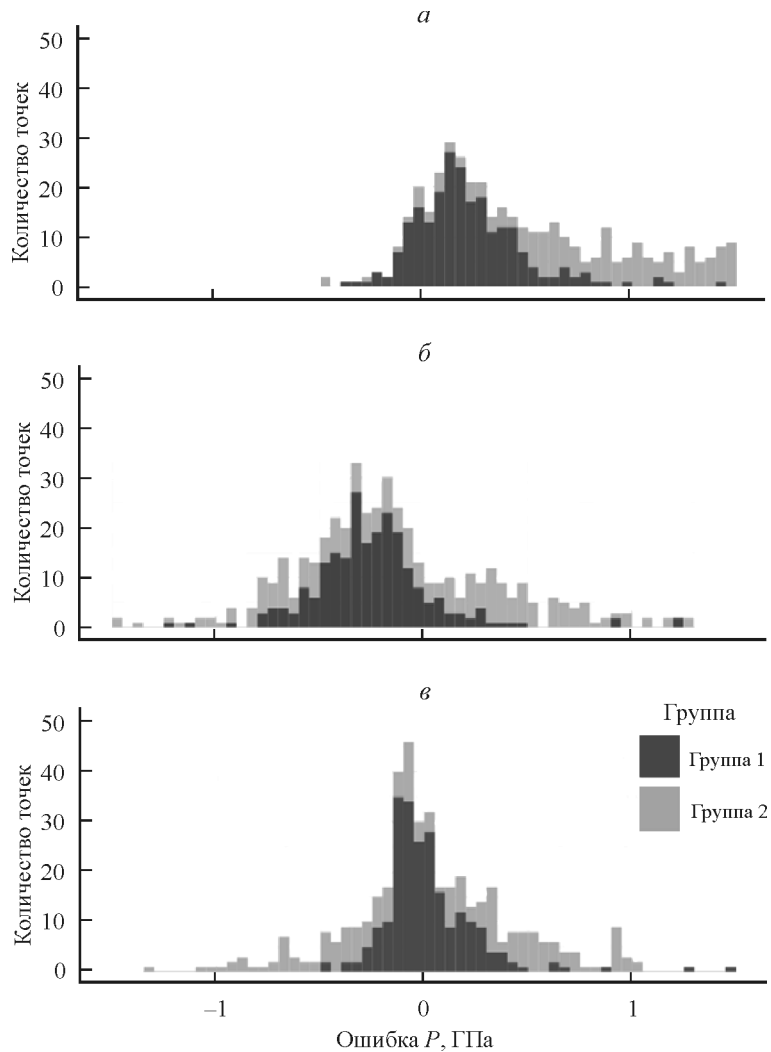


Рис. 4. Гистограммы абсолютных ошибок оценок давления ( $P - P_{\text{расч}}$ ), полученных с помощью фенгитовых геобарометров: *а* — Массона—Шрайера (Massonne, Schreyer, 1987), *б* — Каддика—Томпсона (Caddick, Thompson, 2008), *в* — формула (4) и 5.

Fig. 4. Absolute error of the pressure determination ( $P - P_{\text{calc}}$ ) with use of different monomineral phengite barometers (*a*, *b*); *в* — with formulas (4) and (5).

Стандартная погрешность оценок давления для 176 анализов в этом случае составляет 0.56 ГПа при 95%-ной доверительной вероятности. Полученные оценки лежат в диапазоне 1.5—3.5 ГПа.

При  $T > 750$  °C и  $P > 3.5$  ГПа использование фенгита как геобарометра, по видимому, невозможно. Широкие вариации содержаний Si, Al и Mg не позволяют вывести уравнение с ошибкой оценки  $P$  менее 1 ГПа.

Сравнивая формулы (4) и (5), следует отметить перемену знака, с которым в уравнения входит содержание Al, что свидетельствует о наличии качественного различия между группами.

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОБАРОМЕТРА

Находки включений парагонита и омфацита ( $Jd_{49}Ae_{14}$ ) в сульфидах гнейсов блыбского комплекса (зона Передового хребта, Северный Кавказ) позволили предположить существование в них высокобарного парагенезиса, «стертого» из породы под воздействием ретроградных процессов (Конилов и др., 2013). Для обоснования этого предположения были применены формулы фенгитового геобарометра (4, 5). В расчетах использовались данные по 48 анализам фенгита из пород, характеризующих основные разрезы комплекса. Образцы отбирались в бассейнах крупных рек, пересекающих блыбский комплекс — Большой Лабы (обр. 11-124а, 11-124i) и Малой Лабы (обр.: 134-3, kz 155-3, kz 155-4, kz 165), а также ее притоков: реки Уруштен (обр: kz 152b, kz 153-7, kz 3), ручья Копцева (обр. 124-1) и реки Хацавита (обр.: kz 9-3а, kz 9-5, kz 10-10, kz 10-11, kz 10-12). Гранатовый амфиболит 11-124а имеет, по-видимому, апоэклогитовый генезис. В данном шлифе обнаружены Pl—Anpr симплектиты, а в ядрах некоторых зерен амфибола сохранились реликты омфацита. В эпидотовых гнейсах kz 9-3а и kz 156 и во включениях в пирите обнаружен омфацит, а в гранатовом сланце kz 3 — парагонит (Конилов и др., 2013). Остальные образцы представляют собой гнейсы и сланцы, типичные для блыбского комплекса со следующими минеральными ассоциациями: Ep—Ph—Ab±Qtz±Vt±Hbl±Rt и Gr—Hbl—Ph—Ep±Qtz.

Содержание кремния в фенгитах блыбского комплекса (табл. 2) варьирует от 3.03 до 3.39 к.ф., образуя практически непрерывный ряд составов. Отношение Si/Al варьирует в пределах 1.14—1.89.

Таблица 2

**Состав [содержания (мас. %) и формульные коэффициенты (O = 11) компонентов] фенгитов Блыбского метаморфического комплекса и давления, оцененные с помощью фенгитового геобарометра (формулы 4, 5)**

**Composition of phengites and calculated pressures for Blyb metamorphic complex, O = 11**

Образец	P, ГПа	T, °C	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Сумма	Si/Al
124-1В-03	1.29±0.2	680	46.92	0.50	29.43	3.61	0.18	2.28	0.00	0.64	9.33	92.89	1.35
			3.23	0.03	2.39	0.21	0.01	0.23	0.00	0.08	0.82	7	
124-1В-07	1.21±0.2	680	45.23	0.64	30.63	4.22	0.01	1.49	0.27	0.69	9.47	92.65	1.25
			3.14	0.03	2.51	0.25	0.00	0.16	0.02	0.09	0.84	7.04	
kz10-11-02	2.27±0.4	680	51.52	0.74	27.29	3.49	0.04	2.80	0.00	0.42	10.60	96.9	1.6
			3.39	0.04	2.12	0.19	0.00	0.28	0.00	0.06	0.89	6.97	
kz10-11-05	2.21±0.4	680	45.28	0.11	24.32	3.66	0.00	3.07	0.05	0.04	9.67	86.2	1.58
			3.32	0.00	2.10	0.22	0.00	0.33	0.00	0.90	7.07		
kz10-11-06	2.09±0.4	680	49.55	0.42	28.54	3.74	0.36	2.78	0.12	0.22	10.67	96.4	1.48
			3.29	0.02	2.23	0.21	0.20	0.28	0.01	0.03	0.90	7.17	
kz10-11-07	2.16±0.4	680	49.72	0.30	28.75	2.43	0.28	2.82	0.00	0.47	10.62	95.39	1.47
			3.33	0.01	2.27	0.14	0.01	0.28	0.00	0.06	0.91	7.01	
kz10-11-08	2.09±0.4	680	47.09	0.30	27.44	2.70	0.00	2.55	0.06	0.14	10.33	90.61	1.46
			3.29	0.01	2.26	0.16	0.00	0.27	0.00	0.02	0.92	6.93	
kz10-11-09	2.25±0.4	680	50.61	0.44	27.29	3.79	0.17	3.25	0.34	0.18	10.55	96.62	1.58
			3.36	0.02	2.13	0.21	0.01	0.32	0.02	0.02	0.89	6.98	
kz10-12-06	2.18±0.4	680	49.37	0.00	26.94	3.78	0.00	2.57	0.20	0.00	10.39	93.25	1.56
			3.35	0.00	2.15	0.22	0.00	0.26	0.01	0.00	0.90	6.89	



Таблица 2 (продолжение)

Образец	P, ГПа	T, °C	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Сумма	Si/Al
kz10-12-11	2.1±0.4	680	42.16	0.45	23.50	4.04	0.00	2.44	0.08	0.22	9.68	82.57	
			3.29	0.03	2.16	0.26	0.00	0.28	0.00	0.03	0.96	7.01	1.52
11-124i-01.2	2.14±0.4	680	45.32	0.62	23.90	6.38	0.00	2.86	0.49	0.00	9.97	89.54	
			3.31	0.03	2.06	0.39	0.00	0.31	0.04	0.00	0.93	7.07	1.61
11-124i-03	2.04±0.4	680	45.32	0.54	26.84	3.01	0.00	2.41	0.06	0.22	9.83	88.23	
			3.27	0.03	2.28	0.18	0.00	0.26	0.00	0.03	0.91	6.96	1.43
11-124i-07	1.42±0.2	680	45.52	0.19	27.89	5.40	0.31	2.73	0.00	0.31	10.38	92.73	
			3.16	0.01	2.28	0.31	0.02	0.28	0.00	0.04	0.92	7.02	1.39
152b-01	2.19±0.4	680	46.80	0.45	26.23	3.51	0.00	3.42	0.07	0.60	9.63	90.71	
			3.30	0.02	2.18	0.21	0.00	0.36	0.00	0.08	0.87	7.02	1.51
152b-03	2.12±0.4	680	48.19	0.39	27.96	3.11	0.19	3.14	0.00	0.75	9.80	93.53	
			3.28	0.02	2.24	0.18	0.01	0.32	0.00	0.10	0.85	7	1.46
kz153-7-01	2.04±0.4	680	48.11	1.24	28.56	3.16	0.15	2.77	0.00	0.74	9.86	94.59	
			3.25	0.06	2.27	0.18	0.01	0.28	0.00	0.10	0.85	7	1.43
kz153-7-02	2.16±0.4	680	48.94	0.56	28.28	2.36	0.10	3.04	0.00	0.42	9.85	93.55	
			3.31	0.03	2.26	0.13	0.00	0.31	0.00	0.06	0.85	6.95	1.46
kz153-7-04	1.24±0.2	680	46.40	0.94	28.39	2.61	0.11	2.77	0.1	0.54	9.82	91.58	
			3.19	0.05	2.30	0.15	0.00	0.28	0.01	0.07	0.86	6.91	1.39
kz155-3-15	2.09±0.4	680	50.08	0.27	28.69	3.65	0.00	2.94	0.05	0.43	9.57	95.68	
			3.28	0.01	2.22	0.20	0.00	0.29	0.00	0.06	0.80	6.86	1.48
kz155-4A-01	1.22±0.2	680	47.40	0.46	30.29	1.87	0.00	2.65	0.05	1.09	8.90	92.71	
			3.22	0.02	2.42	0.11	0.00	0.27	0.00	0.14	0.77	6.95	1.33
kz155-4A-02	1.21±0.2	680	46.78	0.73	29.80	2.65	0.01	2.30	0.00	0.95	8.89	92.11	
			3.21	0.04	2.42	0.15	0.00	0.23	0.00	0.13	0.78	6.96	1.33
kz156-08	1.09±0.2	680	37.90	0.43	28.09	3.41	0.00	0.99	0.01	1.16	8.16	80.15	
			3.03	0.03	2.65	0.23	0.00	0.12	0.00	0.18	0.83	7.07	1.14
kz156-10	1.22±0.2	680	44.63	0.68	29.10	3.65	0.30	1.70	0.10	1.32	8.14	89.62	
			3.18	0.04	2.44	0.22	0.02	0.18	0.01	0.18	0.74	7.01	1.3
kz156-15	1.29±0.2	680	45.92	0.42	26.96	3.89	0.00	2.32	0.00	0.75	8.92	89.18	
			3.09	0.02	2.28	0.23	0.00	0.29	0.00	0.11	0.82	6.84	1.36
kz156-16	1.07±0.2	680	42.21	0.41	29.89	3.49	0.23	0.85	0.17	0.94	9.04	87.23	
			3.10	0.02	2.58	0.22	0.01	0.09	0.01	0.13	0.84	7	1.2
kz3-18	1.21±0.2	680	45.11	1.10	28.87	3.33	0.00	1.96	0.12	0.78	9.09	90.36	
			3.16	0.06	2.39	0.20	0.00	0.21	0.01	0.11	0.81	6.95	1.32
kz3-20	1.16±0.2	680	44.83	1.11	29.12	3.19	0.00	1.72	0.00	1.12	9.09	90.18	
			3.15	0.06	2.41	0.19	0.00	0.18	0.00	0.15	0.82	6.96	1.31
kz3-22	1.15±0.2	680	44.29	0.61	29.91	4.08	0.00	1.26	0.09	1.28	9.03	90.55	
			3.12	0.03	2.48	0.24	0.00	0.13	0.00	0.17	0.81	6.98	1.26
kz3-23	1.19±0.2	680	45.16	1.17	29.21	3.01	0.00	2.22	0.17	1.15	8.64	90.73	
			3.14	0.06	2.39	0.17	0.00	0.23	0.01	0.16	0.77	6.93	1.31
kz3-24	1.26±0.2	680	46.66	0.39	28.90	3.61	0.00	2.04	0.00	0.83	9.02	91.45	
			3.23	0.02	2.36	0.21	0.00	0.21	0.00	0.11	0.79	6.93	1.37
kz9-3A-02	1.32±0.2	680	45.19	0.58	27.48	3.09	0.00	2.76	0.19	1.29	8.97	89.55	
			3.23	0.03	2.31	0.18	0.00	0.29	0.01	0.18	0.82	7.05	1.4
kz9-3A-10	2.03±0.4	680	44.74	0.81	26.81	2.92	0.00	2.52	0.11	0.85	9.11	88	
			3.25	0.05	2.30	0.18	0.00	0.28	0.01	0.12	0.84	7.03	1.41
kz9-3A-22	2.08±0.4	680	46.68	0.55	27.28	3.53	0.00	3.03	0.00	0.79	9.69	91.55	
			3.26	0.03	2.25	0.21	0.00	0.32	0.00	0.11	0.87	7.05	1.45

Таблица 2 (продолжение)

Образец	$P$ , ГПа	$T$ , °C	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Сумма	Si/Al
kz9-5-02	2.02±0.4	680	46.33	0.69	27.96	3.01	0.03	2.46	0.11	1.48	8.43	90.5	1.41
			3.26	0.04	2.32	0.18	0.00	0.26	0.01	0.20	0.76	7.03	
kz9-5-03	2.18±0.4	680	48.89	0.63	27.62	2.84	0.03	3.06	0.04	0.75	9.40	93.26	1.5
			3.32	0.03	2.21	0.16	0.00	0.31	0.00	0.10	0.82	6.95	
kz9-5-04	2.16±0.4	680	47.13	0.85	26.62	3.06	0.17	2.92	0.09	0.85	8.90	90.59	1.5
			3.31	0.05	2.20	0.18	0.10	0.31	0.00	0.11	0.80	7.06	
kz9-5-04.1	2.11±0.4	680	46.03	0.66	26.40	3.35	0.09	2.53	0.10	0.48	9.22	88.86	1.48
			3.31	0.04	2.24	0.20	0.00	0.27	0.01	0.06	0.84	6.97	
kz9-5-04.2	2.11±0.4	680	46.03	0.66	26.40	3.35	0.09	2.53	0.10	0.48	9.22	88.86	1.48
			3.31	0.04	2.24	0.20	0.00	0.27	0.01	0.06	0.84	6.97	
kz9-5-05	2.15±0.4	680	46.22	0.37	26.26	3.12	0.01	2.63	0.08	0.39	9.16	88.24	1.49
			3.33	0.02	2.23	0.19	0.00	0.28	0.00	0.06	0.4	6.95	
kz9-5-16	2.11±0.4	680	47.35	0.57	27.17	3.73	0.00	2.86	0.00	0.71	9.59	91.98	1.48
			3.29	0.03	2.23	0.22	0.00	0.30	0.00	0.10	0.85	7.02	
11-124A-18	1.3±0.2	680	46.79	0.91	28.57	3.94	0.00	2.16	0.00	0.44	10.14	92.95	1.39
			3.24	0.05	2.33	0.23	0.00	0.22	0.00	0.06	0.89	7.02	
kz10-10-02	1.39±0.2	680	48.08	0.00	31.78	7.37	0.00	1.55	0.00	0.00	10.54	99.32	1.28
			3.16	0.00	2.46	0.40	0.00	0.15	0.00	0.00	0.89	7.06	
kz10-10-2.2	1.08±0.2	680	48.58	0.00	32.00	3.92	0.00	0.75	0.00	0.44	10.52	96.21	1.29
			3.17	0.00	2.46	0.22	0.00	0.07	0.00	0.06	0.88	6.86	

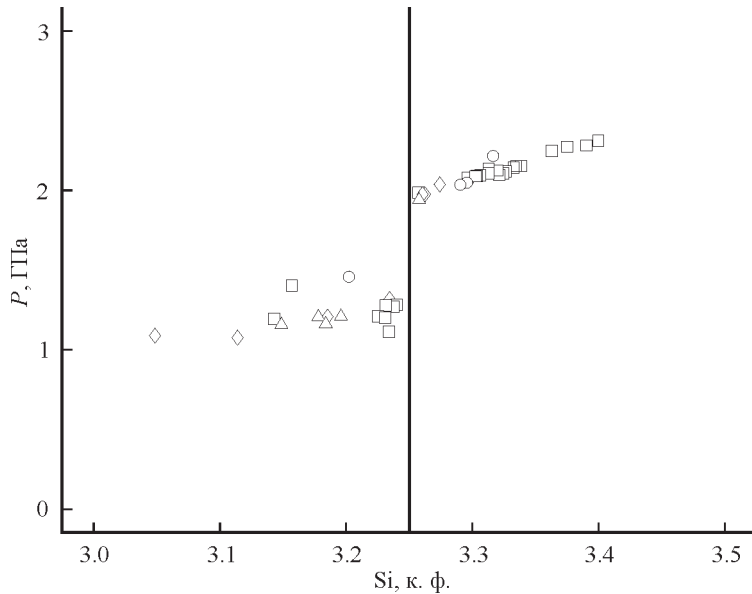


Рис. 5. Зависимость содержания Si в фенгите от давления для пород блыбского комплекса Северного Кавказа.

Кружки — апоэплогитовые гранатовые амфиболиты, квадраты — омфацитсодержащие гнейсы, ромбы — гнейсы и сланцы, треугольники — парагонитсодержащие гнейсы.

Fig. 5. Calculated pressures (GPa) for Blyb complex rocks; circles, squares, triangles — different types of rocks.

Расчет давлений проводился для температуры 680 °С, соответствующей пиковым условиям проградного метаморфизма эклогитов урочища Красной Скалы на р. Уруштен (Perchuk, Philippot, 1997). Исходные данные были разделены на 2 группы с содержанием Si < 3.25 к.ф. и Si > 3.25 к.ф., для которых использовались формулы (4) и (5) соответственно. Для первой группы рассчитанный диапазон давлений оказался равен  $0.8 \pm 0.34$ — $1.4 \pm 0.34$  ГПа, для второй —  $2 \pm 0.56$ — $2.2 \pm 0.56$  ГПа (рис. 5).

Показательным является присутствие в первой и второй группах фенгитов как из вмещающих гнейсов, так и из омфацитсодержащих и апоэклогитовых пород. Подобные вариации состава фенгита, по-видимому, являются результатом активного проявления ретроградных процессов. На это же указывает присутствие среди анализов с содержанием Si менее 3.25 к.ф. анализов, по содержанию алюминия, магния и железа соответствующих второй группе.

С учетом погрешности минимальное давление, рассчитанное для второй группы фенгитов, составляет 1.5 ГПа, что примерно соответствует оценкам давления, полученным для эклогитов Красной Скалы, р. Уруштен (Perchuk, Philippot, 1997) и для пород блыбского комплекса, вмещающих эти эклогиты (1.8 ГПа; Перчук, 1993). Этот факт может служить дополнительным доводом в пользу внутренней когерентности блыбского комплекса и предполагает совместный для эклогитов и вмещающих пород метаморфизм в условиях эклогитовой фации. При этом в результате многоактных наложенных ретроградных процессов следы проградной минеральной ассоциации оказываются практически полностью уничтоженными (Конилов и др., 2013).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования протестированы фенгитовые геобарометры Масона—Шрайера и Каддика—Томпсона с использованием большого массива данных по составам природных и синтезированных фенгитов с известными условиями формирования. Единое уравнение геобарометра не позволяет оценивать давление с удовлетворительной точностью вследствие разнородности исходных данных, формирующих несколько групп (рис. 3), различающихся по температуре, давлению, составу фенгита и характерным минеральным ассоциациям (табл. 1).

По результатам исследования выделены три группы фенгитов, первые две из которых включают в основном природные, а третья — экспериментально полученные образцы. Для третьей группы ( $T > 750$  °С) не выявлено существенной зависимости состава фенгита от давления, что, возможно, связано с неучтенными особенностями экспериментов и влиянием процесса дегидратации на состав фенгита (Gemmi et al., 2008).

Первая и вторая группы фенгитов демонстрируют бимодальное распределение составов. Наилучших результатов для описания зависимости этих составов от давления удалось добиться методом линейной регрессии данных, рассматривая каждую из групп по отдельности. Таким образом было выведено два уравнения геобарометра и достигнута погрешность оценки  $P$ , равная  $\pm 0.34$  ГПа для первой группы и  $\pm 0.56$  ГПа для второй при 95%-ной доверительной вероятности.

По сравнению с ранее предложенными геобарометрами удалось добиться небольшого повышения точности для первой группы (на 0.15 ГПа для геоба-

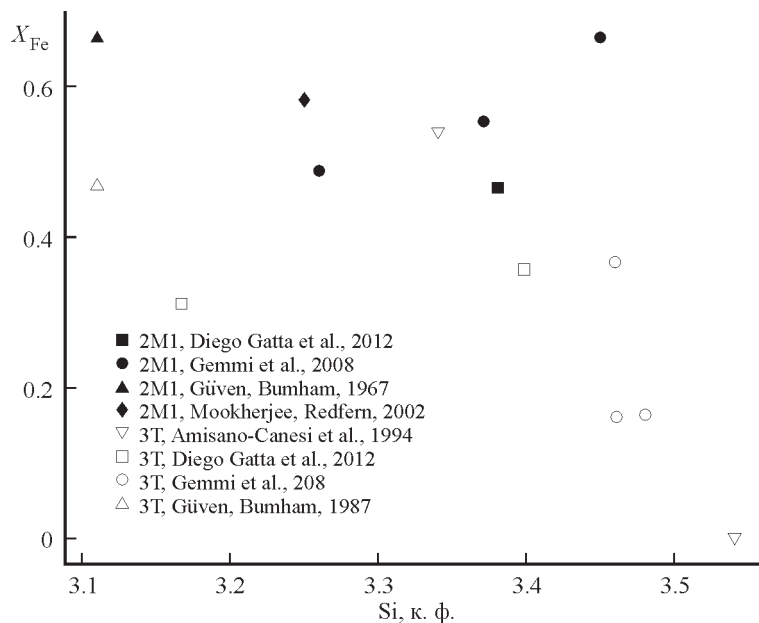


Рис. 6. Диаграмма распределения 2M<sub>1</sub> и 3T поли типов фенгита в зависимости от содержания Si и железистости  $X_{Fe}$  слюды по данным разных авторов.

Fig. 6. Diagram of the 2M<sub>1</sub> and 3T phengite polytypes distribution in dependence on the Si content (a. p. fu) and the ferruginosity ( $X_{Fe}$ ), according to published data.

рометра Масона—Шрайера и на 0.35 ГПа для геобарометра Каддика—Томпсона) и существенного повышения точности для второй группы за счет устранения систематической ошибки.

Несмотря на увеличение точности по сравнению с геобарометром Каддика—Томпсона, величина ошибки остается довольно большой, что позволяет использовать выведенные уравнения лишь для приблизительной оценки давлений в широком спектре минеральных ассоциаций, содержащих фенгит. При этом, условием получения наиболее достоверных оценок давления является содержание Si в фенгите менее 3.25 к.ф. при  $T < 750^{\circ}C$ .

Открытым является вопрос о причине распределения составов природных фенгитов на две группы. Не до конца ясна природа области с содержанием Si 3.25 к.ф., являющейся областью нестабильных составов, вероятно, вследствие разных типов изоморфизма. Не выявлена связь содержания кремния с переходом между поли типами 2M<sub>1</sub> и 3T (рис. 6), однако анализ минеральных ассоциаций показывает, что граница двух групп, вероятно, совпадает с переходом кианит-силлиманит.

По мнению авторов, дальнейшее совершенствование фенгитового геобарометра целесообразно лишь применительно к конкретным минеральным ассоциациям. Вместе с тем основным результатом обсуждаемой работы является подтверждение возможности использования фенгитового геобарометра для оценки давлений в широком диапазоне минеральных ассоциаций.

Применение полученных уравнений геобарометра (4, 5) для фенгитов блыбского комплекса Большого Кавказа показало, что пиковое давление при метаморфизме вмещающих эклогиты гнейсов могли достигать 2.0—2.2 ГПа и

во всяком случае было не меньше 1.5 ГПа, что согласуется с данными предшественников и является дополнительным аргументом в пользу метаморфической когерентности комплекса.

Авторы выражают благодарность академику В. В. Ревердатто за прочтение рукописи и ценные замечания и советы.

#### Список литературы

Конюков А. Н., Бондаренко Г. В., Докукина К. А., Камзолкин В. А. Сульфиды Блыбского метаморфического комплекса Северного Кавказа — новый тип минералов-контейнеров высокобарных и дометаморфических ассоциаций // Геофизические исследования. **2013**. Т. 14. № 1. С. 79—86.

Перчук А. Л. Метаморфизм кианитовых эклогитов урочища Красная скала (Передовой хребет Большого Кавказа) // Петрология. **1993**. Т. 1. № 1. С. 98—109.

Петрология метаморфических комплексов Большого Кавказа / Под ред. С. П. Кориковского. СПб.—М.: Наука, **1991**. 231 с.

#### References

Amisano-Canesi A., Chiari G., Ferraris G., Ivaldi G., Soboleva S. V. Muscovite- and phengite-3T: crystal structure and conditions of formation. *Eur. J. Miner.* **1994**. Vol. 6. P. 489—496.

Auzanneau E. M., Schmidt W., Vielzeuf D., Connolly J. A. D. Titanium in phengite: a geobarometer for high temperature eclogites. *Contrib. Miner. Petrol.* **2010**. Vol. 159. P. 1—24.

Buick I. S., Stevens G., Gibson R. L. The Role of water retention in the anatexis of metapelites in the Bushveld Complex aureole, South Africa: an Experimental study. *J. Petrol.* **2004**. Vol. 45. P. 1777—1797.

Caddick M. J., Thompson A. B. Quantifying the tectono-metamorphic evolution of pelitic rocks from a wide range of tectonic settings: mineral compositions in equilibrium. *Contrib. Miner. Petrol.* **2008**. Vol. 156. P. 177—195.

Chambers J. A., Kohn M. J. Titanium in muscovite, biotite, and hornblende: Modeling, thermometry, and rutile activities of metapelites and amphibolites. *Amer. Miner.* **2012**. Vol. 97. P. 543—555.

Coggon R., Holland T. J. B. Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers. *J. Metamorph. Geol.* **2002**. Vol. 20. P. 683—696.

Curetti N., Levy D., Pavese A., Ivaldi G. Elastic properties and stability of coexisting 3T and 2M<sub>1</sub> phengite polytypes. *Phys. Chem. Miner.* **2006**. Vol. 32. P. 670—678

Domanik K. J., Holloway J. R. The stability and composition of phengitic muscovite and associated phases from 5.5 to 11 GPa: implications for deeply subducted sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1996**. Vol. 60. P. 4133—4150.

Domanik K. J., Holloway J. R. Experimental synthesis and phase relations of phengitic muscovite from 6.5 to 11 GPa in a calcareous metapelite from the Dabie Mountains, China. *Lithos.* **2000**. Vol. 52. P. 51—77.

Ernst W.G. Significance of phengitic micas from low-grade schists. *Amer. Miner.* **1963**. Vol. 48. P. 1357—1373.

Evans B. W., Patrick B. E. Phengite-3T in high-pressure metamorphosed granitic orthogneisses Seward Peninsula, Alaska. *Canad. Miner.* **1987**. Vol. 25. P. 141—158.

Fonarev V. I., Graphchikov A. A., Konilov A. N. A consistent system of geothermometers for metamorphic complexes. *Int. Geol. Rev.* **1991**. Vol. 33. N 8. P. 743—783.

Forneris J. F., Holloway J. R. Evolution of mineral compositions during eclogitization of subducting basaltic crust. *Amer. Miner.* **2004**. Vol. 89. P. 1516—1524.

Gatta G. D., Rotiroli N., Lotti P., Pavese A., Curetti N. Structural evolution of a 2M<sub>1</sub> phengite mica up to 11 GPa: an in situ single-crystal X-ray diffraction study. *Phys. Chem. Miner.* **2010**. Vol. 37. P. 581—591

Gemmi M., Merlini M., Pavese A., Curetti N. Thermal expansion and dehydroxylation of phengite micas. *Phys. Chem. Miner.* **2008**. Vol. 35. P. 367—379

Grassi D., Schmidt M. W. Melting of carbonated pelites at 8—13 GPa: generating K-rich carbonates for mantle metasomatism. *Contrib. Miner. Petrol.* **2011a**. Vol. 16. P. 169—191.

- Grassi D., Schmidt M. W. The melting of carbonated pelites from 70 to 700 km depth. *J. Petrol.* **2011b**. Vol. 52. P. 765—789.
- Güven N., Burnham C. W. The crystal structure of 3T muscovite. *Zeit. Kris.* **1967**. Vol. 125. P. 163—183.
- Hermann J., Green D. H. Experimental constraints on high pressure melting in subducted crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* **2001**. Vol. 188. P. 149—168.
- Hermann J., Spandler C. J. Sediment melts at sub-arc depths: an experimental study. *J. Petrol.* **2008**. Vol. 49. P. 717—740.
- Johnson M. C., Plank T. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. **1999**. Vol. 1. Paper number 1999GC000014.
- Konilov A. N., Bondarenko G. B., Dokukina K. A., Kamzolkin V. A. Sulfides of Blyb metamorphic complex of the Northern Caucasus: new type of minerals-container for high pressure and premetamorphic mineral assemblages. *Geophys. Res.* **2013**. Vol. 14. N 1. P. 79—86 (in Russian).
- Massonne H. J., Schreyer W. Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz. *Contrib. Miner. Petrol.* **1987**. Vol. 96. P. 212—224.
- Massonne H. J., Szpurka Z. Thermodynamic properties of white micas on the basis of high-pressure experiments in the systems  $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$  and  $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . *Lithos*. **1997**. Vol. 41. P. 229—250.
- Miyashiro A., Shido F. Tschermaksubstitution in low- and middle-grade pelitic schists. *J. Petrol.* **1985**. Vol. 26 Part 2. P. 449—487.
- Mookherjee M., Redfern S. A. T. A high-temperature Fourier transform infrared study of the interlayer and Si-O-stretching region in phengite-2M<sub>1</sub>. *Clay Minerals*. **2002**. Vol. 37. P. 309—321.
- Ota T., Kobayashi K., Katsura T., Nakamura E. Tourmaline breakdown in a pelitic system: implications for boron cycling through subduction zones. *Contrib. Miner. Petrol.* **2008**. Vol. 155. P. 19—32.
- Pawley A. R., Holloway J. R. Water sources for subduction zone volcanism: New experimental constraints. *Science*. **1993**. Vol. 260. P. 664—667.
- Petrology of metamorphic complexes of Greater Caucasus*. Ed. by S.P. Korikovskiy. St. Petersburg—Moscow: Nauka, **1991**. 231 c. (in Russian).
- Perchuk A. L. Metamorphism of kyanite eclogites Red Cliff area (Front Range of the Greater Caucasus). *Petrology*. **1993**. Vol. 1. N 1. P. 98—109 (in Russian).
- Perchuk A. L., Philippot P. Rapid cooling and exhumation of eclogitic rocks from the Great Caucasus, Russia. *J. Metamorph. Geol.* **1997**. Vol. 15. P. 299—310.
- Powell R., Evans J. A. A new geobarometer for the assemblage biotite-muscovite-chlorite-quartz. *J. Metamorph. Geol.* **1983**. Vol. 1. P. 331—336.
- Somin M. L. Pre-Jurassic basement of the Greater Caucasus: Brief overview. *Turkish J. Earth Sci.* **2011**. Vol. 20. P. 545—610.
- Thomsen T. B., Schmidt M. W. The biotite to phengite reaction and mica-dominated melting in fluid + carbonate-saturated pelites at high pressures. *J. Petrol.* **2008**. Vol. 49. P. 1889—1914.
- Tischendorf G., Förster H.-J., Gottesmann B., Rieder M. True and brittle micas: composition and solid-solution series. *Miner. Mag.* **2007**. Vol. 71. P. 285—320.
- Velde B. Phengite micas: Synthesis, stability, and natural occurrence. *Amer. J. Sci.* **1965**. Vol. 263. P. 886—913.
- Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.* **2010**. Vol. 95. P. 185—187.

Поступила в редакцию  
19 марта 2015 г.