

УДК 549.07

DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-2-14-22

## ГЕОТЕРМОБАРОМЕТРИЯ ЛЕРЦОЛИТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОСТАВОВ КЛИНОПИРОКСЕНОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

## GEO THERMOBAROMETRY OF LHERZOLITES BASED ON A CLINOPYROXENE COMPOSITIONS ANALYSIS OF THE $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ MODEL SYSTEM



**З. Ф. Голицына,**  
Институт геологии и минералогии  
им. В. С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск  
zoe.zhurko@igm.nsc.ru

**Z. Golitsyna,**  
Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



**А. А. Кирдяшкин,**  
Институт геологии и минералогии  
им. В. С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск  
aak@igm.nsc.ru

**A. Kirdyashkin,**  
Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



**С. В. Банушкина,**  
Институт геологии и минералогии  
им. В. С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск  
banushkinasv@igm.nsc.ru

**S. Banushkina,**  
Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

Описывается возможность диагностировать условия образования минеральных ассоциаций в значениях температур и давлений, вычисляемых по процентному соотношению миналов энстатита и Са-чермакита в минерале клинопироксене. Задача имеет и обратное решение – состав клинопироксена в системе  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  определяется конкретными значениями температур и давлений.

Минерал клинопироксен встречается во всех типах глубинных пород, имеет вариации состава, что делает его универсальным индикатором физико-химических условий образования минеральных ассоциаций. Анализ образцов лерцолитов Северного Лесото демонстрирует строгую закономерность изменения состава клинопироксена в зависимости от значений температур и давлений.

Представлены данные экспериментальных исследований фазовых взаимоотношений  $\text{Cpx} - \text{Gr}$  (клинопироксен – гранат) модельной системы  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  в диапазоне давлений 12...30 кбар и температур 1325...1650 °С. Составы, полученные в лабораторных условиях на аппарате высоких давлений типа «поршень-цилиндр», при значениях давлений и температур, близких к условиям образования лерцолитов, сохраняют названную закономерность. Выявлено существенное изменение составов клинопироксена в зависимости от температуры и давления.

Представлена полиномиальная зависимость состава клинопироксенов от давления и температуры. Расчет полиномиальной зависимости составов клинопироксенов от температуры и давления оказался справедлив и для данных других авторов. Они хорошо согласуются и дополняют выборку; закономерность, представленная в виде полинома, при этом сохраняется

**Ключевые слова:** фазовая диаграмма; геотермобарометрия; минал; гранатовые лерцолиты; анализ фазовых взаимоотношений; фазовое равновесие; плавление; эвтектическая реакция; высокие давления; полином

The possibility of diagnosing the conditions for the formation of mineral associations in terms of temperature and pressure values, which, in turn, can be calculated by the enstatite and Ca-chermakite minals percentage in the clinopyroxene is described in this article. This problem has an inverse solution as well – the clinopyroxene

composition in the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system is determined by the unique values of temperatures and pressures.

The clinopyroxene is found in all types of deep-seated rocks and also has the broadest composition variations, which makes it a universal physicochemical conditions indicator for the formation of mineral associations. Analysis of the Northern Lesotho lherzolites samples demonstrates the strict pattern of changes in the clinopyroxene composition depending on the values of temperatures and pressures. The experimental studies data of the Cpx – Gr (clinopyroxene – garnet) phase relationships of the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> model system are presented in the pressure range 12...30 kbar and temperatures 1325...1650 °C. The compositions retaining this pattern was obtained in our laboratory conditions on a piston-cylinder type high-pressure apparatus, at pressures and temperatures close to the conditions for the formation of lherzolites. It consists in increasing the enstatite and Ca-chermakite components percentage with temperature rise and their decrease with pressure rise. Thus, a significant change in clinopyroxene compositions both as a function of temperature, and pressure was revealed.

The polynomial dependence of the clinopyroxene composition on pressure and temperature is presented. The polynomial dependence calculation of clinopyroxene compositions on temperature and pressure turned out to be valid for data of other authors. They are in good agreement and complement our data sampling, and the pattern presented in the form of a polynomial is preserved

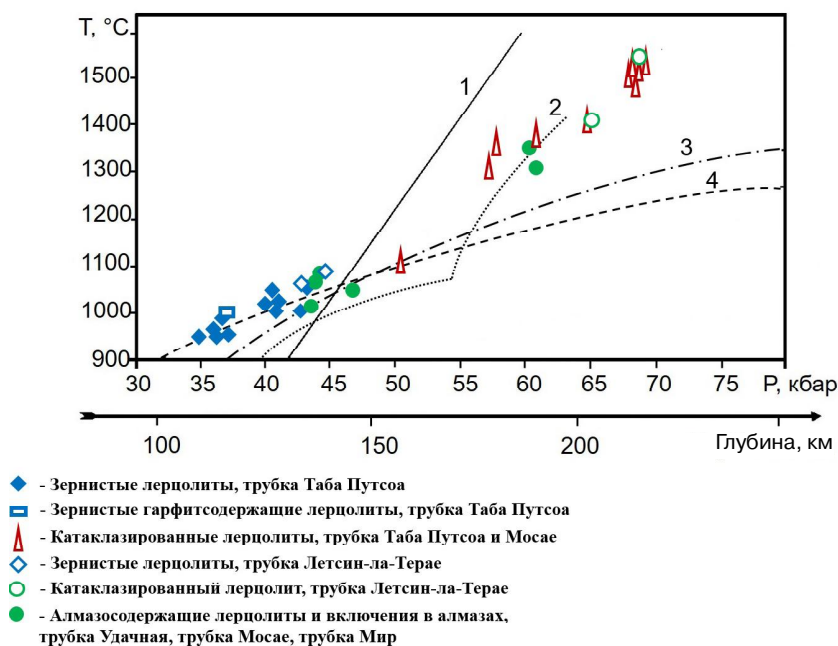
**Key words:** phase diagram; geothermobarometry; mineral; garnet lherzolites; analysis of phase relationships; phase equilibrium; melting; eutectic reaction; high pressures; polynomial

**В**ведение. Установление стратификации глубинных ксенолитов на основе палеогеотермобарометрических построений представляет собой одну из важнейших задач петрологии. Не смотря на интерес к данной проблеме, к настоящему времени существует ограниченное количество попыток построения палеогеотермы на основе минералогических геотермобарометров. Наиболее успешной подобной разработкой является лерцолитовая палеогеотерма, построенная Ф. Р. Бойдом для коллекции ксенолитов гранатовых лерцолитов из кимберлитов Северного Лесото [8]. Данная палеогеотерма характеризуется наличием двух ветвей и излома, что отражено на рисунке (кривая 2). Низкотемпературная ветвь, образованная трендом из *P-T* условий (*P* – давление, *T* – температура) для ксенолитов гранатовых лерцолитов с гранулярной структурой, протягивается почти параллельно так называемой щитовой геотерме, рассчитанной С. П. Кларком и А. Е. Рингвудом для древних докембрийских щитов [9], и расположена несколько ниже ее по температуре. Вторая (высокотемпературная) ветвь образована трендом из *P-T* условий ксенолитов с катаклазированной структурой. Она расположена в области более высоких температур и имеет более крутой наклон. Соединяясь, эти две ветви образуют излом.

Для определения температуры Ф. Р. Бойд использовал Ca/(Ca+Mg) соотношение в клинопироксене, которое прокали-

ровано при давлении 30 кбар [8]. Влияние давления на это соотношение не учитывалось. Поэтому, в зависимости от величины давления, происходит занижение оцениваемых температур на 20...80 °C. И. Д. МакГрегор определял величины давления с использованием экспериментальных данных по содержанию глинозема в ортопироксене системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> [11]. В последующих экспериментальных исследованиях показано, что кальциевый и железистый компоненты значительно снижают растворимость глинозема в ортопироксене, что приводит к завышению оцениваемого давления.

Позднее лерцолитовая палеогеотерма подробно проанализирована с помощью других геотермобарометров и геотермометров, учтены некоторые недостатки геотермобарометрических зависимостей [4; 6]. В зависимости от характера используемых геотермометров и геобарометров, других допущений, положение палеогеотермы несколько смещалось, однако принципиальная картина не претерпевала заметных изменений. Приблизительно сохранялся интервал вычисляемых *P-T* условий и явственно обнаруживался излом геотермы. При детальном рассмотрении излом отчетливо выражен в тех случаях, когда в качестве геотермобарометра использован какой-либо вариант растворимости глинозема в ортопироксене. Возникает вопрос об использовании других геотермобарометрических зависимостей для проверки конфигурации лерцолитовой палеогеотермы Бойда.



Условия формирования гранатовых лерцолитов по образцам Северного Лесото: 1 – граница перехода графит-алмаз [10]; 2 – лерцолитовая геотерма [8], 3 – континентальная геотерма, рассчитанная для теплового потока  $40 \text{ мВт} \times \text{м}^{-2}$  (геотерма « $40 \text{ мВт} \times \text{м}^{-2}$ ») [14]; 4 – щитовая геотерма [9] / Formation conditions of garnet lherzolites based on samples from Northern Lesoto: 1 – boundary of the graphite-diamond transition [10], 2 – lherzolite geotherm [8], 3 – continental geotherm calculated for heat flow of  $40 (40 \text{ mW} \times \text{m}^{-2} \text{ geotherm})$  [14], 4 – shield geotherm [9]

Для геотермобарометрии лерцолитового парагенезиса наиболее подходит ассоциация  $\text{Crx} + \text{Orx} + \text{Gr}$ , которая является аналогом целой серии глубинных пород, таких как гранатовые пироксениты, гранатовые лерцолиты (плюс оливин). В системе  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  ассоциация  $\text{Crx} + \text{Orx} + \text{Gr}$  является дивариантной, и состав пироксенов для заданных значений температуры и давления описывается фиксированной точкой состава. В результате появляется принципиальная возможность определения температуры и давления по составу одной фазы – клинопироксена. Клинопироксены встречаются во всех типах глубинных пород, а также имеют широчайшие вариации состава, что делает их универсальным индикатором физико-химических условий образования минеральных ассоциаций. Основные компоненты природных клинопироксенов – стехиометричные миалы [2].

Для верификации данных, используемых для построения геотермы, исследованы фазовые взаимоотношения  $\text{Crx} - \text{Gr}$  модель-

ной системы  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  в диапазоне давлений 12...30 кбар и температур 1325...1650 °С.

В статье использованы следующие обозначения: An – анортит; CaTs – кальций-чермакит (минал)  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ ; Cor – корунд; Crx – твердые растворы клинопироксенов; Di – диопсид  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ; En – энстатит  $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ; Glass – стекло; Gr – твердые растворы граната; Gros – гроссуляр; Orx – Ортопироксен; Pyr – пироп; Sp – шпинель.

**Методика экспериментальных исследований.** Исходные вещества взяты в виде навесок из предварительно прокаленных оксидов ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) [1]. Далее приготовлены смеси, соответствующие стехиометрии  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  (Di),  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  (Gr) и  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$  (CaTs) (табл. 1).

Полученные составы набирали в заданных пропорциях и подвергали плавлению при температурах 1325...1650 °С. Образцы закалывали путем опускания платинового тигля в дистиллированную воду. В результате получены прозрачные стекла.

Таблица 1 / Table 1

Условия приготовления исходных веществ / Preparation conditions of the starting materials

Состав, мол. % / Composition, mol. %	Фазовый состав смеси и состав этих фаз, мол. % / Phase composition of the mixture and the composition of these phases, mol. %	Исходные компоненты / Starting components	Метод приготовления: P, T, t / Preparation method: P, T, t
Di <sub>28</sub> ,9En <sub>48</sub> ,9CaTs <sub>22</sub> ,2	Di+En+Cor	Di; En; Cor	Механическая смесь
Di <sub>28</sub> ,9En <sub>48</sub> ,9CaTs <sub>22</sub> ,2	Срх+Орх+Gr;	Di; En; Cor	25 кбар, 1500 °С, 5 ч
	Gr=Pyr <sub>82</sub> ,1Gros <sub>17</sub> ,9;		
	Срх=Di <sub>29</sub> ,2En <sub>47</sub> ,7CaTs <sub>23</sub> ,1		
Di <sub>28</sub> ,9En <sub>48</sub> ,9CaTs <sub>22</sub> ,2	Glass	Di; En; Cor	1 кгс/см <sup>2</sup> , 1600 °С, 1 ч
Di <sub>28</sub> ,9En <sub>48</sub> ,9CaTs <sub>22</sub> ,2	Di+En+Gr;	Di; En; Gr	Механическая смесь
	Gr=Pyr <sub>86</sub> Gros <sub>14</sub>		
Di <sub>18</sub> ,3En <sub>53</sub> ,2CaTs <sub>28</sub> ,6	Di+En+Gr;	Di; En; Gr	Механическая смесь
	Gr=Pyr <sub>84</sub> Gros <sub>16</sub>		
Di <sub>18</sub> ,3En <sub>53</sub> ,2CaTs <sub>28</sub> ,6	Срх+Орх+Gr;	Di; En; Cor	25 кбар, 1450 °С, 10 ч
	Gr=Pyr <sub>83</sub> ,7Gros <sub>16</sub> ,3;		
	Срх=Di <sub>52</sub> ,5En <sub>32</sub> ,5CaTs <sub>15</sub> ,5		
Di <sub>17</sub> En <sub>48</sub> CaTs <sub>35</sub>	Glass	Di; En; Cor	1 кгс/см <sup>2</sup> , 1600 °С, 1 ч
Di <sub>17</sub> En <sub>48</sub> CaTs <sub>35</sub>	Di+En+Gr;	Di; En; Gr	Механическая смесь
	Gr=Pyr <sub>84</sub> Gros <sub>16</sub>		
Di <sub>16</sub> En <sub>50</sub> CaTs <sub>34</sub>	Di+En+Cor	Di; En; Cor	Механическая смесь
Di <sub>40</sub> Pyr <sub>60</sub> (мас. %)	Di+Glass	Di; Glass (Pyr)	Механическая смесь
Di <sub>30</sub> Pyr <sub>70</sub> (мас. %)	Glass	Di; Glass (Pyr)	1 кгс/см <sup>2</sup> , 1600 °С, 1 ч

Эксперименты при высоком давлении проводили на аппарате высокого давления типа «поршень-цилиндр» методом закаливания [1; 5]. Точность измерения температуры оценивается как  $\pm 1$  °С. Точность поддержания давления в ходе экспериментов составляет  $\pm 0,3$  кбар [4–6].

После проведения эксперимента печь выключали и закаливали образцы, опуская платиновый тигель в дистиллированную воду. Вся процедура закаливания до комнатной температуры не превышала по продолжительности 3...5 с.

*Методика анализа продуктов эксперимента.* После опыта полученный образец извлекали из ампулы, делали поперечный скол и изготавливали двусторонне полированный шлиф, с ориентировкой преимущественно вдоль вертикальной оси образца. Анализ фазовых взаимоотношений проводили изучением шлифа на поляризационном петрографическом микроскопе ПОЛАМ Л-211 и Olympus BX51 с фотоприставкой.

Анализ состава фаз проводили на электронном микроанализаторе "Comebax-Micro" и на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU с помощью спектрометра с энергетической дисперсией (система микроанализа Inca Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments) [3].

Дополнительно диагностику фаз проводили по КР спектрам, которые получены с помощью КР-спектрометра фирмы Jobin YVON. Эталоны спектров фаз взяты из базы данных: Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals (<http://rruff.info/>).

В образцах после опытов продиагностированы следующие фазы: Di, En, Gr, Cor, Glass. В области солидуса образцы представлены мелкокристаллическими срастаниями фаз с размером зерен 1...3 мкм.

*Результаты исследования.* В исследуемой области *P-T* пространства состав граната в ассоциации Ср+Орх+Gr не испытывает существенных изменений. Согласно резуль-

татам экспериментов и данным других исследователей, гранат содержит 12...16 % гроссулярового компонента, независимо от интенсивных параметров (табл. 2). Состав клинопироксена меняется как в зависимости от температуры, так и от давления. С ростом температуры в клинопироксене повышается содержание энстатитового компонента: при 1600 °С составляет 50 мол. %. С ростом дав-

ления содержание энстатитового компонента в клинопироксене падает. Кальций-чермакитовый компонент возрастает с ростом температуры и падает с увеличением давления, достигая максимального значения – 36 мол. %, в интервале давлений 15...16 кбар при температуре 1400...1420 °С в невариантной точке (Срх, Орх, Gr, An, Sp, Glass) (см. табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Результаты анализа состава клинопироксенов и гранатов на электронном микроанализаторе (лабораторные данные и данные других авторов), % / The composition analysis results of clinopyroxenes and garnets on an electronic microanalyzer (laboratory data and data of other authors), %

№*	Состав Срх / Composition of Срх, %							Состав Gr / Composition of Gr, %					
	мас. / wt.					мол. / mol.		мас. / wt.					мол. / mol.
	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Сумма	CaTs	En	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Сумма	Gros
1	13,62	21,4	15,98	47,53	98,53	29	59,1	4,56	26,36	24,08	43,46	98,46	11,2
2	13,66	19,33	22,09	43,17	98,25	46,1	48,2	3,28	27,61	24,38	43,69	98,96	8,1
3	11,54	22,71	15,35	49,59	99,19	32,7	55,3	3,07	27,31	24,36	44,26	99	6,7
5	13,96	20,41	17,02	46,68	98,07	36,2	46	5,18	26,13	23,13	44,27	98,71	12,7
8	14,18	21,62	14,31	49,65	99,76	30,2	45,6	-	-	-	-	-	-
9	14,7	22,23	9,53	52,31	98,77	20,06	42,2	5,62	24,88	23,53	44,89	98,92	13,8
10	14,55	23,78	8,7	51,31	98,34	18,2	44,5	5,39	26,05	22,87	44,2	98,51	13,4
11	17,56	19,91	10,52	51,03	99,02	22,7	31,2	7,56	23,56	24,17	44,3	99,59	17,5
13	17,33	21,78	5,14	54,78	99,03	11,2	31,3	-	-	-	-	-	-
15	17,37	21,79	5,23	54,85	99,24	11,4	31,3	5,68	25,17	23,87	45,26	99,98	13,8
19	17,77	20,46	9,53	53,35	101,11	20,4	31	5,44	24,34	25,64	43,78	99,2	13,9
21	16,82	20,85	10,38	51,14	99,19	22,2	34,7	7,36	24,98	23,36	44,15	99,85	17,5
30	18,1	19,43	9,72	51,71	98,96	21,2	28,3	-	-	-	-	-	-
57	21,31	18,8	5,3	53,72	99,13	11,6	15,5	5,11	25,18	24,56	44,12	98,97	12,4
60	21,48	18,63	4,72	54,04	98,87	10,3	14	6,78	25,41	23,26	44,13	99,58	16,1
63	20,61	19,96	3,5	54,66	98,73	7,7	18	8,47	24,77	22,56	44,19	99,99	19,7

\* № – номер опыта / № – experiment number

Результаты других исследователей характеризуют картину для прочих *P-T* областей, однако и в них прослеживается зависимость состава клинопироксенов от интенсивных параметров. Точки, совпадающие по температуре и давлению, дают результаты с незначительным расхождением в составе клинопироксена, например, данные Дж. Акеллы, Ф. Р. Бойда, Д. Перкинса и Р. Ньютона, К. Г. Никеля и др. [7; 8; 12; 13].

Полином, аппроксимирующий зависимость состава клинопироксенов от давления

и температуры, имеет вид  $F = f_1 + f_2x + f_3y + f_4xy + f_5x^2y + f_6xy^2$ , где  $x$  – мол. %  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ ,  $y$  – мол. %  $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ . В табл. 3 представлены коэффициенты названного полинома  $f_1 \dots f_6$ . При расчете коэффициентов использованы данные проведенных исследований (табл. 3, «Данные лаборатории»), а также авторов Дж. Акеллы, Д. Перкинса и Р. Ньютона, Х. Ямады и Е. Такахаши [7; 13; 15].

Данные, использованные в статье К. Г. Никеля, Г. П. Брэя и Л. Когарко [12], получены на аппарате типа «белт», для которого

проведены тщательные калибровки, позволяющие считать, что точность контроля параметров близка к аппарату типа «поршень-цилиндр». При этом сами исследователи отдают предпочтение показателям, определенным в работе Д. Перкинса и Р. Ньютона [13]. Однако сопоставление результатов разных исследований показывает, что К. Г. Никель, Г. П. Брэй и Л. Когарко в своих наработках значительно ближе к объединенному набору данных,

включающих данные наших исследований и исследований Дж. Акеллы и Ф. Р. Бойда [7; 8], чем Д. Перкинс и Р. Ньютон. По названным причинам использовать материалы статьи «Ортопироксен-клинопироксеновые равновесия в системе CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS): новые экспериментальные результаты и значение для двухпироксеновой термометрии» [12] в целях геотермобарометрии исследуемой области не удалось.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты полинома / Polynomial coefficients

Параметры и источник данных / Parameters and data source	Обозначения коэффициентов / Notation for coefficients	Значения коэффициентов / Coefficient values					
		1	2	3	4	5	6
Давление / Pressure	f <sub>1</sub>	34,0236	38,7518	27,0227	41,2778	57,5034	33,5218
	f <sub>2</sub>	-0,00957751	0,180913	0,798817	0,281855	0,310274	1,6749
	f <sub>3</sub>	-1,15622	-1,82625	-1,64806	-2,21568	-3,80621	-3,59934
	f <sub>4</sub>	-0,00104523	0,0053182	0,00376749	0,00417817	0,0017665	-0,0142125
	f <sub>5</sub>	0,0070219	0,0338607	0,0457039	0,042474	0,00695367	0,0792497
	f <sub>6</sub>	0,0155621	-0,0074391	-0,0290174	-0,00845051	-0,0019081	-0,0166674
	d	3,57845	4,30288	5,05479	4,71794	11,5101	11,9843
	N	53	65	91	78	88	114
Температура / Temperature	f <sub>1</sub>	996,633	931,793	824,347	945,363	991,991	848,616
	f <sub>2</sub>	16,841	17,5363	23,9643	19,0215	20,7771	29,4139
	f <sub>3</sub>	-7,9043	-3,53503	-2,59467	-6,70361	-13,5109	-12,7003
	f <sub>4</sub>	0,0997314	-0,0910034	0,126854	-0,13332	-0,160805	-0,261677
	f <sub>5</sub>	0,0748291	0,0454407	0,149139	0,0707626	0,203896	0,259651
	f <sub>6</sub>	-0,0773926	0,0134277	-0,165344	0,0691681	-0,0735168	-0,0104828
	d	49,07558	52,9754	56,1474	52,4121	61,1803	68,3109
	N	53	65	91	78	88	114
Источник / Source		Данные лаборатории	Данные лаборатории; [7]; [13]	Данные лаборатории; [7]; [13]; [15]	Данные лаборатории; [7]; [13]	Данные лаборатории; [7]; [13]; [15]	Данные лаборатории; [7]; [13]; [15]

Примечание: d – стандартное отклонение; N – число точек (P, T) / Note: d – standard deviation, N – number of points (P, T)

В работе Дж. Акеллы исследования составов Di-Pyr в тройной системе CaSiO<sub>3</sub>-MgSiO<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> проведен на аппарате «поршень-цилиндр» в области давлений

26...44 кбар и температур 1000...1500 °C [7]. Д. Перкинс и Р. Ньютон представляют результаты экспериментов на аппарате «поршень-цилиндр» по определению составов

для ассоциации Gr-Cpx-Orx системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> для давлений 15...40 кбар и температур 900... 1100 °С [13].

Область давлений свыше 50 кбар исследована в работе Х. Ямады, Е. Такахаша [15] на многопуансонном аппарате, точность измерения параметров на котором значительно ниже, чем на аппарате «поршень-цилиндр». Сопоставлять результаты этой работы с другими данными весьма трудно, хотя следует отметить полное совпадение качественной картины изменения состава твердых растворов под действием температуры и давления.

Для создания геотермобарометрической зависимости предполагается использовать полученные лабораторные данные и данные ряда других исследований [7; 8]. При выявлении геотермобарометрической зависимости сопоставление разнородных результатов на основании лишь методических особенностей носит субъективный характер [4; 7; 12; 13; 15]. Поэтому для сопоставления

результатов одних исследований с показателями, полученными в других, целесообразно использовать статистические методы сравнения.

**Заключение.** Исследование фазовых взаимоотношений в сечении модельной системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> позволило показать, что содержание энстатитового компонента изменяется в основном с температурой, а содержание кальций-чермакитового компонента уменьшается с ростом давления. Выявлено существенное изменение составов клинопироксена в зависимости от давления и температуры.

Анализ экспериментальных данных, полученных нами в ходе исследования, и экспериментальных результатов других авторов позволил построить уточненную версию полиномиальной функции, которая аппроксимирует зависимость составов клинопироксенов от температуры и давления.

#### Список литературы

1. Банушкина С. В., Сурков Н. В., Голицына З. Ф. Особенности плавления фаз в сечении диопсид – кальциевая молекула Эскола в интервале давлений 1 кгс/см<sup>2</sup> – 20 кбар // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 7. С. 6–17.
2. Голицына З. Ф., Банушкина С. В., Сурков Н. В. Сопоставление составов кристаллических алюмосиликатных пород и слагающих эти породы минералов на плоской треугольной проекции // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 3. С. 322–335.
3. Лаврентьев Ю. Г., Карманов Н. С., Усова Л. В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 8. С. 1473–1482.
4. Сурков Н. В. Лерцолитовая палеогеотерма // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века / под ред. А. Д. Савко, Н. Н. Зинчук. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2003. С. 430–433.
5. Сурков Н. В., Гартвич Ю. Г., Изох О. П. Устойчивость и фазовые взаимоотношения нестехиометрических клинопироксенов в сечении диопсид-«Са-молекула Эскола» при высоких давлениях // Геохимия. 2007. № 6. С. 632–642.
6. Сурков Н. В., Кузнецов Г. Н. Экспериментальное исследование устойчивости твердых растворов клинопироксенов в ассоциации Cpx+Orx+Gr системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 12. С. 18–25.
7. Akella J. Garnet pyroxene equilibria in the system CaSiO<sub>3</sub>-MgSiO<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and in a natural mineral mixture // American Mineralogist. 1976. Vol. 61, No. 7–8. P. 589–598.
8. Boyd F. R. A pyroxene geotherm // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1973. Vol. 37, No. 12. P. 2533–2546.
9. Clark S. P., Ringwood A. E. Density distribution and constitution of the mantle // Reviews of Geophysics. 1964. Vol. 2, No. 1. P. 35–88.
10. Kennedy C. S., Kennedy G. C. The equilibrium boundary between graphite and diamond // Journal of Geophysical Research. 1976. Vol. 81, No. 14. P. 2467–2470.
11. MacGregor I. D. The system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>: solubility of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions // American Mineralogist. 1974. Vol. 59, No. 1–2. P. 110–119.
12. Nickel K. G., Brey G. P., Kogarko L. Orthopyroxene-clinopyroxene equilibria in the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS): new experimental results and implications for two-pyroxene thermometry // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1985. Vol. 91, No. 1. P. 44–53.

13. Perkins D., Newton R. C. The composition of coexisting pyroxenes and garnet in the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> at 900 – 1,100 °C and high pressures // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1980. Vol. 75, No. 3. P. 291–300.
14. Pollack H. N., Chapman D. S. On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness // *Tectonophysics*. 1977. Vol. 38, No. 3–4. P. 279–296.
15. Yamada H., Takahashi E. Subsolidus phase relations between coexisting garnet and two pyroxenes at 50 to 100 kbar in the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> // *Developments in Petrology*. 1984. Vol. 11, No. 2. P. 247–255.

## References

1. Banushkina S. V., Surkov N. V., Golitsyna Z. F. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of the Transbaikal State University), 2019, vol. 25, no. 7, pp. 6–17.
2. Golitsyna Z. F., Banushkina S. V., Surkov N. V. *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 2018, vol. 59, no. 3, pp. 322–335.
3. Lavrentiev Yu. G., Karmanov N. S., Usova L. V. *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 2015, vol. 56, no. 8, pp. 1473–1482.
4. Surkov N. V. *Problemy prognozirovaniya, poiskov i izucheniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh na poroge XXI veka* (Problems of forecasting, exploration and study of mineral deposits into the XXI century) / eds. Savko A. D., Zinchuk N. N. Voronezh: Voronezh State University Publishing House, 2003, pp. 430–433.
5. Surkov N. V., Kuznetsov G. N. *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 1996, vol. 37, no. 12, pp. 18–25.
6. Surkov N. V., Gartvich Yu. G., Izoh O. P. *Geokhimiya* (Geochemistry International), 2007, no. 6, pp. 632–642.
7. Akella J. *American Mineralogist* (American Mineralogist), 1976, vol. 61, no. 7–8, pp. 589–598.
8. Boyd F. R. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Geochimica et Cosmochimica Acta), 1973, vol. 37, no. 12, pp. 2533–2546.
9. Clark S. P., Ringwood A. E. *Reviews of Geophysics* (Reviews of Geophysics), 1964, vol. 2, no. 1, pp. 35–88.
10. Kennedy C. S., Kennedy G. C. *Journal of Geophysical Research* (Journal of Geophysical Research), 1976, vol. 81, no. 14, pp. 2467–2470.
11. MacGregor I. D. *American Mineralogist* (American Mineralogist), 1974, vol. 59, no. 1–2, pp. 110–119.
12. Nickel K. G., Brey G. P., Kogarko L. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (Contributions to Mineralogy and Petrology), 1985, vol. 91, no. 1, pp. 44–53.
13. Perkins D., Newton R. C. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (Contributions to Mineralogy and Petrology), 1980, vol. 75, no. 3, pp. 291–300.
14. Pollack H. N., Chapman D. S. *Tectonophysics* (Tectonophysics), 1977, vol. 38, no. 3–4, pp. 279–296.
15. Yamada H., Takahashi E. *Developments in Petrology* (Developments in Petrology), 1984, vol. 11, no. 2, pp. 247–255.

---

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

---

## Коротко об авторах

Голицына Зоя Фридриховна, мл. науч. сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: петрология, минералогия, кристаллография, экспериментальные исследования при высоких давлениях, физико-химический анализ  
zoe.zhurko@igm.nsc.ru

Кирдяшкин Алексей Анатольевич, д-р геол.-минер. наук, профессор РАН, зав. лабораторией физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геодинамических процессов, тектонофизика, геотектоника  
aak@igm.nsc.ru



*Банушкина Софья Викторовна*, мл. науч. сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: петрология, магматизм, экспериментальные исследования при высоких давлениях, физико-химический анализ.

banushkinasv@igm.nsc.ru

### Briefly about the authors

---

*Zoya Golitsyna*, research assistant, Physical and Chemical Modeling of Geological Processes laboratory, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: petrology, mineralogy, crystallography, experimental investigations at high pressures, physico-chemical analysis

*Aleksey Kirdyashkin*, doctor of geology and mineralogy sciences, professor, Russian Academy of Sciences, chief of the Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, associate professor, General and Regional Geology Section, Geology and Geophysics department, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: laboratory and theoretical modeling of geodynamic processes, tectonophysics, geotectonics

*Sofiya Banushkina*, research assistant, Physical and Chemical Modeling of Geological Processes department, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Scientific interests: petrology, magmatism, experimental investigations at high pressures, physico-chemical analysis

### Образец цитирования

---

*Голицына З. Ф., Кирдяшкин А. А., Банушкина С. В. Геотермобарометрия лерцолитов на основе анализа составов клинопироксенов модельной системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 2. С. 14–22. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-2-14-22.*

*Golitsyna Z., Kirdyashkin A., Banushkina S. Geothermobarometry of Lherzolites Based on a Clinopyroxene Compositions Analysis of the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Model System // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 14–22. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-2-14-22.*

Статья поступила в редакцию: 19.12.2019 г.

Статья принята к публикации: 04.02.2020 г.