

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИННЫХ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ
НА ОСНОВЕ ПОЛЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОРУНД-, ШПИНЕЛЬНОРМАТИВНЫХ
АССОЦИАЦИЙ СИСТЕМЫ $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$

Н.В. Сурков, Ю.Г. Гартвич

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Котлякова, 3, Россия*

В рамках разработки физико-химических моделей происхождения кристаллических горных пород проведены экспериментальные исследования области высокоглиноземистых составов системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ при давлениях от 10 до 30 кбар и в интервале температур 1250—1535 °С. В результате установлены фазовые взаимоотношения между An, Sp, Cpx, Cor, Ga и L, определен наклон лучей моновариантных реакций $\text{An} + \text{Sp} = \text{Cpx} + \text{Cor} + (\text{Ga})$, $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Ga} + \text{Cor} + \text{Sp}$, положение инвариантной точки (An, Sp, Cpx, Cor, Ga, L) и составы фаз, участвующих в этих реакциях.

На основе топологического анализа исследованного участка системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ приведено необходимое и достаточное обоснование положения о том, что реакция «эклогитизации» должна иметь вид: $\text{Opx} + \text{An} + \text{Sp} = \text{Cpx} + \text{Ga}$. Прослежена непрерывная серия эвтектических моновариантных равновесий: $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Opx} + \text{Fo} + \text{An}$, $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Opx} + \text{An} + \text{Sp}$, $\text{L} = \text{Cpx} + (\text{Ga}) + \text{An} + \text{Sp}$ и $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Cor} + (\text{Ga}) + \text{An}$, имеющая фундаментальный характер. Изменение состава расплава в этой серии эвтектических реакций в зависимости от давления должно наследоваться в природных условиях как наиболее вероятный путь эволюции магм. Сопоставление областей составов, в которых реализуется установленная в работе серия эвтектических реакций, с составами пород магматических формаций показывает, что эта эвтектическая серия наиболее близка к породам щелочноземельной серии. В качестве парагенетического признака отмечается, что минералогические составы кумулятов и фенокритов, встречаемых в эффузивных и дайковых разновидностях пород этой серии, соответствуют уникальным наборам субсолидусных ассоциаций фаз и отдельным субсолидусным фазам, кристаллизующихся в этой фундаментальной серии эвтектик.

Фазовая диаграмма, щелочноземельная серия пород, моновариантные реакции, инвариантное равновесие, реакция «эклогитизации», эвтектика, эволюция магм.

MODELING OF DEEP-SEATED HIGH-ALUMINA PARAGENESES ON THE BASIS
OF THE STABILITY FIELDS OF CORUNDUM- AND SPINEL-NORMATIVE
ASSEMBLAGES OF THE SYSTEM $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$

N.V. Surkov and Yu.G. Gartvich

To elaborate physicochemical models for the origin of crystalline rocks, experimental studies of the field of high-alumina assemblages of the system $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ were carried out at 10–30 kbar and 1250–1535 °C. We have determined the phase relations between the melt (L) and An, Sp, Cpx, Cor, and Ga, the slope of the rays of the monovariant reactions $\text{An} + \text{Sp} = \text{Cpx} + \text{Cor} + (\text{Ga})$ and $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Ga} + \text{Cor} + \text{Sp}$, the position of the nonvariant point (An, Sp, Cpx, Cor, Ga, L), and the compositions of phases participating in these reactions.

Based on a topological analysis of the studied site of the system $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$, we have substantiated that “eclogitization” must follow the reaction $\text{Opx} + \text{An} + \text{Sp} = \text{Cpx} + \text{Ga}$. A fundamental continuous series of eutectic monovariant equilibria was observed: $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Opx} + \text{Fo} + \text{An}$, $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Opx} + \text{An} + \text{Sp}$, $\text{L} = \text{Cpx} + (\text{Ga}) + \text{An} + \text{Sp}$, and $\text{L} = \text{Cpx} + \text{Cor} + (\text{Ga}) + \text{An}$. A change in the melt composition in this series of eutectic reactions depending on pressure must reflect the most likely magma genesis trend in nature. Composition fields in which the above series of reactions is observed with the composition fields of the rocks of magmatic formations showed that this series is most similar to the alkali-earth series of rocks. The mineralogical compositions of cumulates and phenocrysts found in the effusive and dike varieties of these rocks correspond to unique sets of subsolidus phase associations and individual subsolidus phases crystallizing in this fundamental eutectic series.

Phase diagram, alkali-earth series of rocks, monovariant reactions, nonvariant equilibrium, “eclogitization” reaction, eutectic, magma genesis

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования являются основным методом для решения вопросов генезиса глубинных пород и расплавов. Наиболее популярной моделью для этих целей является фазовая диаграмма системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$. Несмотря на некоторую упрощенность и кажущуюся абстрактность этой системы, с ее помощью были решены главные вопросы изменения минералогического состава горных пород в глубинных слоях земной коры и верхней мантии. Для этого были изучены наиболее «петрологически интересные» участки этой системы. Однако на сегодняшний день осталось много участков фазовой диаграммы этой системы, имеющих химический состав, далекий от большинства распространенных природных парагенезисов, хотя исследование этих областей составов дает важную информацию, позволяющую объяснять генезис и интерпретировать происхождение геологических объектов. Одним из таких малоисследованных участков системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ является корунднормативная область составов, изучению которой посвящена данная работа.

В тексте, таблицах и на рисунках использованы сокращения для названий минералов в традиционной, наиболее читаемой форме: Cpx — клинопироксен (твердые растворы диопсидового ряда), Орх — ортопироксен (твердые растворы энстатитового ряда), Ga — гранат (твердые растворы ряда пироп — гроссуляр), Fo — форстерит, An — анортит, Sp — шпинель (MgAl_2O_4), Ky — кианит, Cor — корунд, Q — кварц, Prg — пироп ($\text{Mg}_3\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$), Gross — гроссуляр ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ СИСТЕМЫ $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$

Ключевым моментом в строении субсолидуса системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ являются две невариантные точки (Cpx, Орх, Ga, Fo, An, Sp) и (Cpx, Орх, Ga, Q, An, Ky) [Kushiro, Yoder, 1966; Hensen, 1981; Сурков, 1995].

Реакции, лучи которых выходят из этих невариантных точек, контролируют устойчивость и порядок смены парагенезисов при изменении P - T условий соответственно в форстерит- и кварцнормативных областях составов. Эти области составов представляют собой как бы две независимые подсистемы. В области высоких давлений (свыше 30—36 кбар) они практически не связаны друг с другом, что определяется наличием так называемого «эклогитового барьера» и вызвано образованием полной серии твердых растворов пироп—гроссуляр. В области низких давлений строение системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ усложняется, здесь устойчив ряд коннод, переходящих из кварцнормативной области составов в форстеритнормативную, особенно в области ликвидуса. Характерной особенностью этих коннод является то, что их все можно отнести к областям состава с высоким содержанием глинозема. В связи с этим особый интерес для изучения строения системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ представляет исследование фазовых взаимоотношений в области составов с высоким содержанием глинозема.

Из анализа экспериментального материала по плавлению системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ известно, что при атмосферном давлении [Osborn, Tait, 1952; Hytonen, Schairer, 1960; 1961] на ликвидусе существует коннода An-Sp, а при давлениях 15—20 кбар и выше — коннода Cpx-Cor [Presnall et al., 1978]. Отсюда следует, что в области высокоглиноземистых составов при высоких давлениях существует моновариантная реакция типа $\text{An} + \text{Sp} = \text{Cpx} + \text{Cor}$ или $\text{An} + \text{Sp} = \text{Cpx} + \text{Cor} + \text{Ga}$, которая контролирует взаимоотношения фаз в солидусе и ликвидусе во всей области составов, обогащенных глиноземом.

Поэтому была поставлена задача изучения взаимоотношений между фазами An, Sp, Cpx, Cor, Ga и L для определения положения невариантной точки (An, Sp, Cpx, Cor, Ga, L), наклона лучей моновариантных реакций, а также состава фаз, участвующих в этих реакциях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная часть работы выполнена на аппарате высокого давления типа «поршень—цилиндр» [Годовиков и др., 1971] по методике, тождественной ранее опубликованной [Сурков и др., 2007]. В качестве нагревательного устройства использована ячейка на основе хлорида натрия [Сурков, 1992].

Давление определяли по усилию нагрузки за вычетом поправки на трение, которую определяли по разнице усилия нагрузки и расчетного усилия, необходимого для фазового перехода $\text{Vi}_I\text{—Vi}_{III}$ (25.4 кбар) при комнатной температуре. Для калибровки висмутовую проволоку диаметром 0.2 мм и длиной 3—5 мм в таблетке из хлористого серебра помещали непосредственно на поршень. Точность поддержания и измерения давления специально нами не оценивалась, но, по оценкам других исследователей [Mirvald et al., 1975], на «ячейке низкого трения» составляет около ± 0.3 кбар. Для определения и регулировки температуры использовали платинородиевую термопару PtRd6-PtRd30. Управление температурой производили при помощи регулятора температуры ВРТ-3. Точность поддержания температуры соответствовала ± 1 °С. Влияние давления на ЭДС термопары не учитывали. Точность измерения температуры по этой методике оценивается не хуже ± 10 °С [Boyd, England, 1960].

Исходные вещества приготовлены весовым методом из прокаленных (1100 °С; 5—6 ч) оксидов марок ОСЧ (особо чистый). Оксиды прокаливали в платиновых тиглях, навеску приготавливали сразу же по остыванию платинового тигля до комнатной температуры в эксикаторе над P₂O₅. Смесь оксидов прокаливали при температурах 1300—1700 °С на 50—100 °С ниже температуры, соответствующей температуре плавления, и через каждые 8—10 ч растирали в ступке из твердого сплава. Прокаливание производили до полного исчезновения исходных оксидов. Этим способом были приготовлены смеси, отвечающие по стехиометрии MgAl₂O₄, CaAl₂Si₂O₈, Mg₃Al₃Si₃O₁₂ и Ca₃Al₂Si₃O₁₂, корунд получен из гидроокислов алюминия прокаливанием при 1200—1300 °С. Из этих веществ весовым методом были приготовлены рабочие смеси, часть из которых впослед-

Таблица 1. Характеристика исходных составов

| Номер состава | Исходный состав, мол. % | Исходные реактивы | Условия обработки |
|---------------|---------------------------------------|-------------------|--|
| S-97 | Pyr ₅₀ Gross ₅₀ | Оксиды марок ОСЧ | Расплавлен в прозрачное стекло при 1650—1700 °С, 0,5 ч. |
| S-61 | Pyr ₆₀ Gross ₄₀ | » | » |
| S-93 | Pyr ₇₀ Gross ₃₀ | » | » |
| S-89 | An ₅₀ Sp ₅₀ | » | Механическая смесь: MgAl ₂ O ₄ и анортит |
| S-90 | An _{66.7} Sp _{33.3} | » | » |
| S-91 | An _{33.3} Sp _{66.7} | » | » |
| S-89a | An ₅₀ Sp ₅₀ | » | Расплавлен в прозрачное стекло при 1650—1700 °С, 0,5 ч. |
| S-90a | An _{66.7} Sp _{33.3} | » | » |
| S-91a | An _{33.3} Sp _{66.7} | » | » |

следствии была расплавлена в прозрачное стекло в электропечи с нагревателями из силицида молибдена при температурах 1600—1700 °С в платиновом тигле в атмосферных условиях. Характеристики этих смесей и условия их обработки проведены в табл. 1. Исходные вещества помещали в платиновую ампулу и просушивали при 500—600 °С в течение 7—8 ч, после чего ампулу герметизировали электросваркой.

В предварительных исследованиях были использованы исходные вещества с разным набором фаз (стекла, фазы субсолидуса: шпинель, анортит и т.д.). В результате было установлено, что равновесие в исследуемых смесях достигается достаточно быстро, выдержки 3—8 ч вполне достаточно для получения результатов, неразличимых с результатами, получаемыми в опытах, когда используются стекла. Продолжительность экспериментов, выбранная при исследовании, была заведомо в несколько раз большей, чем требуется для удовлетворительного приближения к состоянию равновесия. В связи с этим не было необходимости использовать метод моновариантной смеси. Для гарантированного получения максимально крупных зерен (что значительно облегчает анализ состава фаз на электронном микроанализаторе), предпочтение было отдано исходным смесям, состоящим из гомогенного стекла. Следует заметить, что в экспериментах, в которых равновесие не достигается и сохраняются остатки исходных или промежуточных фаз, размер зерен синтезированных фаз недостаточен для анализа их состава с помощью электронного микроанализатора.

После опыта полученный образец извлекали из ампулы, делали поперечный скол и из него изготавливали двусторонне полированный шлиф, с ориентировкой вдоль вертикальной оси образца. Остальную часть образца использовали для рентгенофазового анализа. Рентгеновскую съемку образцов проводили на дифрактометре «ДРОН-3».

Анализ фазовых взаимоотношений производили изучением шлифа на поляризационном петрографическом микроскопе ПОЛАМ Л-213. Только петрографическое изучение шлифа позволяет выявить правильные взаимоотношения фаз. Жидкость часто не закаливается в стекло, особенно в тех случаях, когда температура лишь ненамного превышает температуру плавления. Диагностика плавления становится возможной только по характерным закалочным структурам, образующимся при девитрификации стекла. В исследованной области составов преобладающей закалочной фазой является клинопироксен.

Анализ состава фаз проводили на электронном микроанализаторе Camebax-Micro. Основная трудность этого анализа состоит в том, что даже при появлении жидкости размер зерен некоторых фаз редко превышает 10 мкм (например, шпинель). Увеличение продолжительности экспериментов не приводит к заметному росту зерен. В субсолидусе наибольшая величина зерна (до 30 мкм) получается при использовании стекол в качестве исходных веществ. Поэтому в большинстве экспериментов было отдано предпочтение составам, которые были предварительно расплавлены и закалены в виде стекла.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Из имеющихся сведений по моновариантному равновесию $An + Sp = Crx + Cor$ нельзя сделать каких-либо выводов о наклоне луча этой реакции, а также о ее виде. Возможно, в самом общем случае, эту реакцию следует представлять в виде $An + Sp = Crx + (Ga) + Cor$. Однако объем составов, занимаемый ассоциацией $(Crx + Ga + Cor)$, очень узкий, и, скорее всего, эта реакция должна быть вырожденной

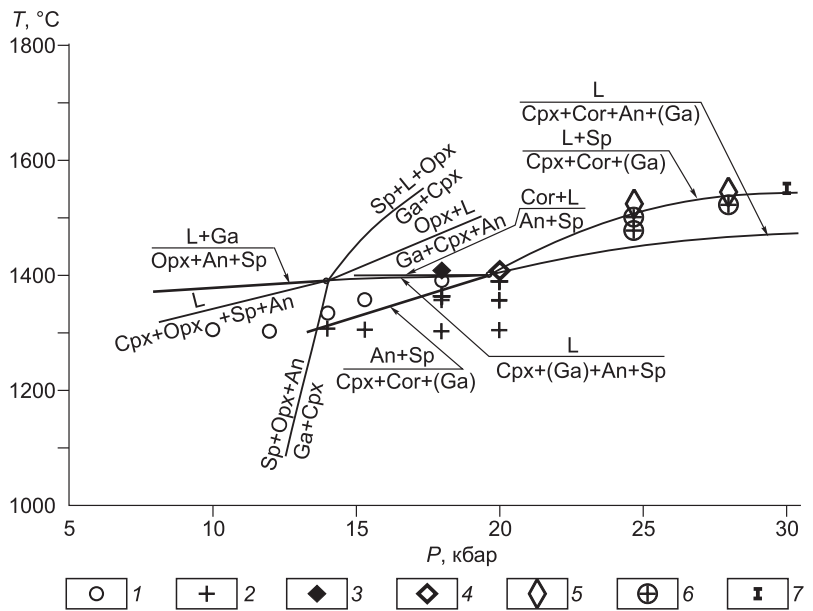
Таблица 2.

**Результаты экспериментов по исследованию
моновариантного равновесия $An + Sp = Cpx + Cor + (Ga)$**

| Номер опыта | Номер состава | Исходный состав, мол. % | Давление, кбар | Температура, °C | Время, ч | Обнаруженные фазы |
|-------------|---------------|-------------------------|----------------|-----------------|----------|--------------------|
| P218 | S89 | $An_{50}Sp_{50}$ | 20 | 1358 | 10 | Cpx, Cor, Sp |
| P219 | S90 | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 20 | 1358 | 10 | » |
| P220 | S91 | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 20 | 1358 | 10 | » |
| P228 | S89 | $An_{50}Sp_{50}$ | 18 | 1306 | 10 | » |
| P229 | S90 | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 18 | 1306 | 10 | Cpx, Cor, An, Sp |
| P230 | S91 | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 18 | 1306 | 10 | Cpx, Cor, Sp |
| P243 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 15.3 | 1389 | 8.5 | An, Sp, Cpx, Cor |
| P244 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 15.3 | 1389 | 8.5 | » |
| P245 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 15.3 | 1389 | 8.5 | L, Cor, Sp |
| P224 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 15.3 | 1356 | 10 | Cpx, Cor, Sp, (An) |
| P225 | S89 | $An_{50}Sp_{50}$ | 15.3 | 1306 | 10 | » |
| P226 | S90 | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 15.3 | 1306 | 10 | » |
| P227 | S91 | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 15.3 | 1306 | 10 | Cpx, Cor, Sp |
| P240 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 14 | 1333 | 10 | Cor, An, Sp |
| P241 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 14 | 1333 | 10 | » |
| P242 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 14 | 1333 | 10 | » |
| P231 | S89 | $An_{50}Sp_{50}$ | 14 | 1307 | 10 | An, Sp, Cpx, Cor |
| P232 | S90 | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 14 | 1307 | 10 | » |
| P233 | S91 | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 14 | 1307 | 10 | » |
| P234 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 12 | 1303 | 8 | » |
| P235 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 12 | 1303 | 8 | An, Sp, Cor |
| P236 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 12 | 1303 | 8 | » |
| P237 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 10 | 1306 | 9,2 | » |
| P238 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 10 | 1306 | 9,2 | » |
| P239 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 10 | 1306 | 9,2 | » |
| P246 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 18 | 1358 | 9 | Cpx, Cor, An, Sp |
| P247 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 18 | 1358 | 9 | Cpx, Cor, Sp, An |
| P248 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 18 | 1358 | 9 | Cor, Cpx, Sp |
| P249 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 18 | 1363 | 8 | Cpx, Cor, An, Sp |
| P250 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 18 | 1363 | 8 | Cpx, Cor, An |
| P251 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 18 | 1363 | 8 | Cor, Sp, Cpx |
| P252 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 18 | 1409 | 9 | L, Cor, Sp |
| P253 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 18 | 1409 | 9 | » |
| P254 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 18 | 1409 | 9 | » |
| P255 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 20 | 1409 | 9 | L, Cor, Sp, Cpx |
| P256 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 20 | 1409 | 9 | L, Cor, Cpx |
| P257 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 20 | 1409 | 9 | L, Cor, Sp |
| P258 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 20 | 1392 | 9.2 | Cpx, Cor, An, Sp |
| P259 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 20 | 1392 | 9.2 | Cor, Cpx |
| P260 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 20 | 1392 | 9.2 | Cpx, Cor, Sp |
| P261 | S89a | $An_{50}Sp_{50}$ | 22 | 1393 | 9 | » |
| P262 | S90a | $An_{66.7}Sp_{33.3}$ | 22 | 1393 | 9 | Cpx, Cor |
| P263 | S91a | $An_{33.3}Sp_{66.7}$ | 22 | 1393 | 9 | Cpx, Cor, Sp |

Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований моновариантных реакций $Sp + An = Cpx + (Ga) + Cor$, $Sp + L = Cpx + (Ga) + Cor$ и $Cpx + Ga + Cor + An = L$.

1 — $An + Sp$, 2 — $Cpx + Cor$, 3 — $L + Cor + Sp$, 4 — $L + Cpx + Cor$, 5 — $L + Crystal$, 6 — $Cpx + Ga + Cor$, 7 — температура плавления в магнезиальной части сечения пироп—гроссуляра при 30 кбар.



и иметь вид $An + Sp = Cpx + Cor$. Экспериментальная проверка, является ли эта реакция вырожденной или нет, не даст достоверного и однозначного ответа. Проблема заключается в технической сложности диагностики при незначительном содержании фаз в продуктах опыта, в данном случае это относится к гранату. Однако для решения поставленной задачи этот вопрос не имеет принципиального значения.

Для исследования были использованы смеси трех составов в сечении анортит—шпинель ($An-Sp$). Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 1. В области давлений, при которых устойчива ассоциация анортита и шпинели, на рентгенограмме продуктов опыта всегда присутствует небольшое количество корунда, который является новообразованной фазой, и его появление может быть связано только с отклонением в стехиометрии анортита или шпинели. Анализ рентгеновских характеристик этих фаз и анализы их состава с помощью микрозонда не выявили достоверных отклонений от стехиометрии. По-видимому, масштаб этого явления весьма мал и отклонения в составе и рентгеновских характеристиках не превышает точности анализа.

Реакция $An + Sp = Cpx + Cor$ прослежена нами в интервале давлений 10—20 кбар и температур 1300—1390 °C. Луч реакции имеет положительный наклон и пересекается с лучом реакции $L = Cpx + (Ga) + An + Sp$, выходящим из невариантной точки (Cpx, Ga, Opx, An, Sp, L) [Сурков, 1995], образуя

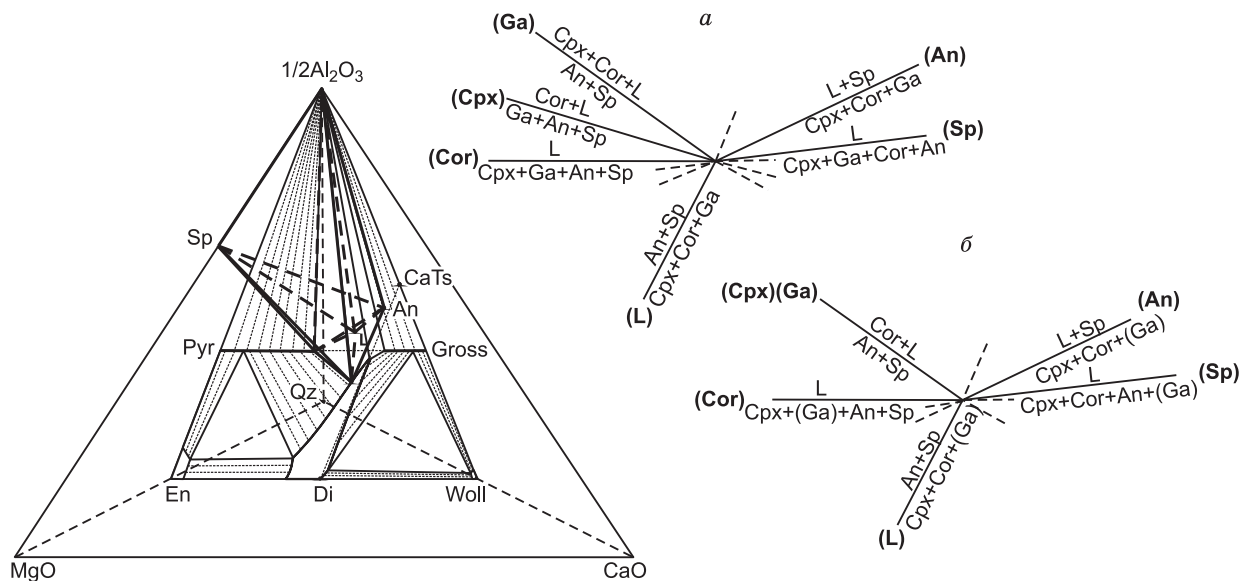


Рис. 2. Фазовый объем невариантного равновесия (Sp, An, Cpx, Ga, Cor, L).

a — вариант невариантного равновесия (Sp, An, Cpx, Ga, Cor, L), когда моновариантная реакция $Sp + An = Cpx + Ga + Cor$ не является вырожденной. *b* — вариант невариантного равновесия ($Sp, An, Cpx, (Ga), Cor, L$), когда моновариантная реакция $Sp + An = Cpx + (Ga) + Cor$ является вырожденной.

Таблица 3. Усредненные анализы фаз из экспериментов по исследованию моновариантного равновесия $An + Sp = Cpx + Cor + (Ga)$

| Номер опыта | Фаза | N | мас. % | | | | | | мол. % | | | | | | форм. ед. | | | | | |
|-------------|------|---|--------|-------|--------------------------------|------------------|-------|-------|--------|--------------------------------|------------------|-------|--------|--------|-----------|--------|--------|--|--|--|
| | | | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Сумма | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Сумма | Ca | Mg | Al | Si | Сумма | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | |
| P218 | Cpx | 1 | 16.07 | 9.4 | 39.17 | 37.5 | 100.7 | 18.75 | 15.26 | 25.14 | 40.84 | 100 | 0.5888 | 0.4792 | 1.5787 | 1.282 | 3.9287 | | | |
| P218 | Sp | 4 | 0.046 | 26.89 | 69.33 | 0.11 | 96.33 | 0.061 | 49.43 | 50.38 | 0.133 | 100 | 0.0012 | 0.9842 | 2.0062 | 0.0026 | 2.9942 | | | |
| P219 | Cpx | 2 | 23.44 | 9.94 | 22.94 | 43.4 | 99.84 | 25.93 | 15.3 | 13.95 | 44.82 | 100 | 0.9006 | 0.5314 | 0.9693 | 1.557 | 3.9583 | | | |
| P228 | Sp | 1 | 0.047 | 27.02 | 69.54 | 0.28 | 96.9 | 0.062 | 49.37 | 50.22 | 0.344 | 100 | 0.0012 | 0.9835 | 2.001 | 0.0069 | 2.9926 | | | |
| P228 | Cpx | 4 | 22.23 | 10.96 | 22.75 | 43.6 | 99.6 | 24.51 | 16.82 | 13.8 | 44.86 | 100 | 0.8529 | 0.5854 | 0.9598 | 1.561 | 3.9591 | | | |
| P229 | An | 1 | 17.87 | 0.278 | 35.54 | 45.5 | 99.44 | 22.27 | 0.482 | 24.36 | 52.89 | 100 | 0.8837 | 0.0191 | 1.9333 | 2.0986 | 4.9347 | | | |
| P229 | Cpx | 1 | 19.55 | 9.24 | 31.65 | 39 | 99.47 | 22.68 | 14.91 | 20.19 | 42.22 | 100 | 0.7451 | 0.49 | 1.3269 | 1.3873 | 3.9493 | | | |
| P230 | Sp | 1 | 0.029 | 27.99 | 69.11 | 0.15 | 97.29 | 0.038 | 50.5 | 49.28 | 0.183 | 100 | 0.0008 | 1.0163 | 1.9838 | 0.0037 | 3.0044 | | | |
| P243 | An | 1 | 19.57 | 0.3 | 35.71 | 43.7 | 99.24 | 24.34 | 0.519 | 24.43 | 50.7 | 100 | 0.9759 | 0.0208 | 1.9588 | 2.0325 | 4.9881 | | | |
| P244 | » | 2 | 19.5 | 0.335 | 35.17 | 43.8 | 98.81 | 24.31 | 0.581 | 24.12 | 50.99 | 100 | 0.9764 | 0.0233 | 1.9368 | 2.0476 | 4.984 | | | |
| P245 | L | 3 | 17.59 | 5.247 | 26.61 | 43.8 | 93.24 | 21.88 | 9.079 | 18.2 | 50.84 | 100 | 0.701 | 0.2909 | 1.1665 | 1.6292 | 3.7876 | | | |
| P224 | Cpx | 4 | 21.18 | 10.72 | 27.27 | 39.8 | 99.04 | 24 | 16.9 | 17 | 42.09 | 100 | 0.8178 | 0.576 | 1.1585 | 1.4343 | 3.9865 | | | |
| P225 | An | 1 | 19.87 | 0.293 | 34.36 | 43 | 97.65 | 25.05 | 0.514 | 23.83 | 50.61 | 100 | 1.0108 | 0.0207 | 1.9228 | 2.0421 | 4.9965 | | | |
| P226 | Cpx | 1 | 17.77 | 11.78 | 32.65 | 35.2 | 97.43 | 20.92 | 19.29 | 21.14 | 38.66 | 100 | 0.6936 | 0.6398 | 1.4018 | 1.282 | 4.0171 | | | |
| P226 | An | 1 | 19.37 | 0.397 | 34.85 | 44.4 | 99.19 | 24.05 | 0.686 | 23.8 | 51.47 | 100 | 0.9664 | 0.0276 | 1.9127 | 2.0685 | 4.9752 | | | |
| P227 | Cpx | 3 | 22.7 | 11.48 | 21.79 | 43.6 | 99.63 | 24.86 | 17.5 | 13.13 | 44.52 | 100 | 0.8735 | 0.6147 | 0.9223 | 1.5642 | 3.9747 | | | |
| P240 | An | 1 | 19.12 | 0.374 | 33.97 | 43.8 | 97.45 | 24.14 | 0.657 | 23.59 | 51.61 | 100 | 0.9715 | 0.0264 | 1.8986 | 2.0771 | 4.9736 | | | |
| P241 | » | 1 | 19.25 | 0.314 | 34.41 | 43.9 | 98.02 | 24.19 | 0.549 | 23.79 | 51.47 | 100 | 0.9724 | 0.0221 | 1.912 | 2.0688 | 4.9752 | | | |
| P242 | Sp | 1 | 0.042 | 27.85 | 68.84 | 0.16 | 96.89 | 0.055 | 50.45 | 49.3 | 0.194 | 100 | 0.0011 | 1.0152 | 1.9839 | 0.0039 | 3.0041 | | | |
| P233 | Cpx | 1 | 16.99 | 11.71 | 32.97 | 36.3 | 98.05 | 19.91 | 19.1 | 21.25 | 39.73 | 100 | 0.6556 | 0.6288 | 1.3995 | 1.3081 | 3.9921 | | | |
| P234 | » | 3 | 24.17 | 11.09 | 19.84 | 45.6 | 100.8 | 25.96 | 16.57 | 11.72 | 45.74 | 100 | 0.9207 | 0.5878 | 0.8313 | 1.6223 | 3.9621 | | | |
| P236 | An | 1 | 19.07 | 0.184 | 34.46 | 43.1 | 96.88 | 24.3 | 0.326 | 24.15 | 51.22 | 100 | 0.9743 | 0.0131 | 1.9367 | 2.0538 | 4.9779 | | | |
| P237 | » | 1 | 19.81 | 0.171 | 34.93 | 42.8 | 97.8 | 25.03 | 0.301 | 24.27 | 50.4 | 100 | 1.0063 | 0.0121 | 1.9519 | 2.0269 | 4.9972 | | | |
| P238 | » | 1 | 18.5 | 0.468 | 39.08 | 41.5 | 99.64 | 23.29 | 0.82 | 27.07 | 48.82 | 100 | 0.9183 | 0.0323 | 2.1337 | 1.9244 | 5.0087 | | | |
| P239 | » | 1 | 19.8 | 0.382 | 34.73 | 44.6 | 99.68 | 24.44 | 0.656 | 23.58 | 51.33 | 100 | 0.9851 | 0.0264 | 1.9007 | 2.0687 | 4.9809 | | | |
| P247 | Cpx | 3 | 22.98 | 11.12 | 22.63 | 42.8 | 99.58 | 25.29 | 17.02 | 13.7 | 43.99 | 100 | 0.8853 | 0.596 | 0.959 | 1.5401 | 3.9804 | | | |
| P248 | Cor | 1 | 0 | 0.009 | 100.2 | 0.01 | 100.2 | 0 | 0.023 | 99.97 | 0.008 | 100 | 0 | 0.0005 | 3.9995 | 0.0002 | 4.0001 | | | |
| P249 | Cpx | 1 | 17.72 | 8.68 | 41.61 | 34.4 | 102.4 | 20.89 | 14.24 | 26.98 | 37.89 | 100 | 0.6534 | 0.4453 | 1.6877 | 1.1849 | 3.9713 | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|---|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| P249 | An | 1 | 19.48 | 0.223 | 35.47 | 44 | 99.19 | 24.23 | 0.386 | 24.27 | 51.11 | 100 | 0.971 | 0.0155 | 1.9449 | 2.048 | 4.9795 |
| P250 | Cpx | 3 | 21.81 | 10.56 | 24.29 | 42.3 | 98.96 | 24.41 | 16.45 | 14.95 | 44.19 | 100 | 0.8412 | 0.567 | 1.0306 | 1.5229 | 3.9618 |
| P251 | » | 4 | 22.36 | 10.6 | 24.08 | 42 | 99.02 | 24.97 | 16.48 | 14.79 | 43.76 | 100 | 0.8644 | 0.5703 | 1.0241 | 1.5145 | 3.9734 |
| P252 | Sp | 1 | 0.066 | 26.02 | 72.14 | 0.19 | 98.41 | 0.087 | 47.56 | 52.12 | 0.231 | 100 | 0.0017 | 0.9304 | 2.0393 | 0.0045 | 2.9759 |
| P252 | Cor | 1 | 0.055 | 0.237 | 98.49 | 0.36 | 99.14 | 0.1 | 0.601 | 98.7 | 0.604 | 100 | 0.001 | 0.006 | 1.9872 | 0.0061 | 2.0003 |
| P252 | L | 6 | 20.31 | 7.883 | 28.07 | 44.7 | 100.9 | 22.98 | 12.41 | 17.46 | 47.15 | 100 | 0.7572 | 0.4089 | 1.1509 | 1.5538 | 3.8708 |
| P253 | Cor | 1 | 0.095 | 0.221 | 99.94 | 0.33 | 100.6 | 0.171 | 0.552 | 98.72 | 0.56 | 100 | 0.0017 | 0.0056 | 1.9876 | 0.0056 | 2.0005 |
| P253 | L | 1 | 19.82 | 7.59 | 29.95 | 43 | 100.4 | 22.78 | 12.14 | 18.93 | 46.14 | 100 | 0.7429 | 0.3958 | 1.2348 | 1.5046 | 3.878 |
| P254 | » | 3 | 20.79 | 6.8 | 27.78 | 44.6 | 99.93 | 23.86 | 10.86 | 17.54 | 47.74 | 100 | 0.7832 | 0.3564 | 1.1513 | 1.5667 | 3.8576 |
| P255 | » | 3 | 19.57 | 8.38 | 25.39 | 48.4 | 101.7 | 21.67 | 12.91 | 15.46 | 49.97 | 100 | 0.7186 | 0.4282 | 1.0256 | 1.6574 | 3.8298 |
| P256 | » | 5 | 21.72 | 8.564 | 26.39 | 43.6 | 100.3 | 24.43 | 13.41 | 16.33 | 45.83 | 100 | 0.8213 | 0.4507 | 1.0978 | 1.5407 | 3.9104 |
| P257 | » | 2 | 20.98 | 7.59 | 26.16 | 45.8 | 100.5 | 23.67 | 11.91 | 16.23 | 48.18 | 100 | 0.7861 | 0.3957 | 1.0783 | 1.6004 | 3.8605 |
| P258 | Sp | 1 | 0.003 | 27.02 | 71.73 | 0.2 | 98.96 | 0.004 | 48.68 | 51.08 | 0.239 | 100 | 0 | 0.962 | 2.019 | 0.0047 | 2.9858 |
| P258 | Cpx | 4 | 22.62 | 10.66 | 23.46 | 42.9 | 99.66 | 25.02 | 16.41 | 14.27 | 44.31 | 100 | 0.8685 | 0.5695 | 0.9905 | 1.5381 | 3.9666 |
| P259 | Cor | 1 | 0.029 | 0.061 | 100.5 | 0.1 | 100.7 | 0.052 | 0.153 | 99.62 | 0.173 | 100 | 0.0005 | 0.0015 | 1.9963 | 0.0017 | 2.0001 |
| P259 | Cpx | 3 | 22.13 | 8.99 | 26.08 | 42.8 | 100 | 24.87 | 14.06 | 16.12 | 44.95 | 100 | 0.8422 | 0.4761 | 1.0919 | 1.5219 | 3.9321 |
| P260 | Sp | 1 | 0.048 | 27.49 | 71.29 | 0.37 | 99.2 | 0.062 | 49.13 | 50.36 | 0.444 | 100 | 0.0012 | 0.9769 | 2.0028 | 0.0088 | 2.9898 |
| P260 | Cpx | 3 | 21.61 | 11.05 | 26.16 | 41.2 | 99.99 | 24.06 | 17.12 | 16.02 | 42.8 | 100 | 0.8257 | 0.5876 | 1.0996 | 1.4687 | 3.9815 |
| P261 | » | 3 | 21.24 | 11.92 | 22.54 | 44.1 | 99.8 | 23.24 | 18.15 | 13.56 | 45.05 | 100 | 0.8099 | 0.6325 | 0.9453 | 1.5698 | 3.9575 |
| P262 | » | 4 | 22.73 | 9.023 | 25.51 | 42.8 | 100.1 | 25.46 | 14.06 | 15.72 | 44.76 | 100 | 0.8671 | 0.4789 | 1.0703 | 1.5243 | 3.9406 |
| P263 | » | 1 | 12.65 | 15.51 | 40.72 | 29.7 | 98.53 | 15.01 | 25.6 | 26.57 | 32.83 | 100 | 0.4842 | 0.826 | 1.7144 | 1.0592 | 4.0837 |

Примечание. N — число анализов в точке.

Таблица 4. Результаты экспериментов по исследованию моновариантного равновесия $L + Sp = Crx + Cor + (Ga)$

| Номер опыта | Номер состава | Исходный состав, мол. % | Давление, кбар | Температура, °С | Время, ч | Обнаруженные фазы |
|-------------|---------------|--------------------------------------|----------------|-----------------|----------|---------------------|
| P264 | S-61 | Py ₆₀ Gross ₄₀ | 24.7 | 1475 | 8.25 | Crx + Ga |
| P265 | S-93 | Py ₇₀ Gross ₃₀ | 24.7 | 1475 | 8.25 | Crx + Ga + Cor |
| P266 | S-97 | Py ₅₀ Gross ₅₀ | 24.7 | 1475 | 8.25 | Crx + Sp |
| P267 | S-61 | Py ₆₀ Gross ₄₀ | 24.7 | 1500 | 5 | Crx + Ga + Cor |
| P268 | S-93 | Py ₇₀ Gross ₃₀ | 24.7 | 1500 | 5 | » |
| P269 | S-97 | Py ₅₀ Gross ₅₀ | 24.7 | 1500 | 5 | Crx + Ga |
| P270 | S-61 | Py ₆₀ Gross ₄₀ | 24.7 | 1525 | 5 | L + Crx + Sp |
| P271 | S-93 | Py ₇₀ Gross ₃₀ | 24.7 | 1525 | 5 | L + Crx + Sp + Cor |
| P272 | S-97 | Py ₅₀ Gross ₅₀ | 24.7 | 1525 | 5 | L + Crx + Sp |
| P273 | S-61 | Py ₆₀ Gross ₄₀ | 28 | 1525 | 5 | Ga + Crx |
| P274 | S-93 | Py ₇₀ Gross ₃₀ | 28 | 1525 | 5 | Crx + Ga + Sp + Cor |
| P275 | S-97 | Py ₅₀ Gross ₅₀ | 28 | 1525 | 5 | L + Crx |
| P276 | S-61 | Py ₆₀ Gross ₄₀ | 21.7 | 1535 | 4.5 | L + Crx + Ga |
| P277 | S-93 | Py ₇₀ Gross ₃₀ | 21.7 | 1535 | 4.5 | » |
| P278 | S-97 | Py ₅₀ Gross ₅₀ | 21.7 | 1535 | 4.5 | L + Crx |

сингулярную неинвариантную точку (An, Sp, Crx, Cor, L) (см. рис. 2), которая расположена при 20 кбар и 1400 °С. Из этой точки в сторону высоких давлений выходят лучи реакций $L = Crx + (Ga) + An + Cor$ и $L + Sp = Crx + (Ga) + Cor$.

Реакция $L = Crx + (Ga) + An + Cor$ прослежена нами в интервале давлений 18—20 кбар и температур 1350—1400 °С. Луч этой реакции имеет близкий к горизонтальному положительный наклон. Составы жидкости и других фаз, полученные в опытах, приведены в табл. 3. Сопоставление состава жидкости и химического состава объема, в котором протекает эта реакция, показывает, что жидкость смещена в сторону анортита от плоскости Crx-Ky-Cor.

Второй реакцией плавления, изученной в данном исследовании, является реакция $L + Sp = Crx + (Ga) + Cor$. Она изучена нами при давлениях 20—28 кбар и температурах 1390—1450 °С при помощи смесей, составы которых расположены в сечении пироп—гроссуляр (табл. 4). В проведенных экспериментах жидкость не закаливается в стекло. Вместо стекла получается фаза, которую интерпретировали как «закалочный клинопироксен». Закалочный клинопироксен образует в шлифе характерные структуры типа «петушиный хвост» или «мороз на стекле», по которым он легко диагностируется под микроскопом. На дифрактограмме он дает обычную для клинопироксена картину. Анализы, полученные с помощью микрозонда, показывают незакономерные и иногда значительные вариации состава от точки к точке. Это не позволило определить состав жидкости по составу закалочной фазы, хотя можно уверенно предположить, что состав жидкости находится в непосредственной близости от плоскости энстатит—волластанит—корунд. Составы проанализированных фаз приведены в табл. 5.

При низких давлениях клинопироксен имеет состав с более низким содержанием глинозема, нежели сечение пироп—гроссуляр. При повышении давления до 30 кбар область составов, занимаемая твердыми растворами клинопироксенов, увеличивается, и клинопироксен, участвующий в реакции $L + Sp = Crx + (Ga) + Cor$, становится более глиноземистым нежели твердые растворы гранатов серии пироп—гроссуляр. Это подтверждается тем, что в сечении пироп—гроссуляр в магнезиальной части на ликвидусе отсутствует корунд [Сурков, Гартвич, 2000].

Таким образом, в результате экспериментального исследования установлено положение лучей моновариантных реакций $L = An + (Ga) + Crx + Cor$, $An + Sp = Crx + Cor + (Ga)$ и $L + Sp = Crx + (Ga) + Cor$ и определено положение неинвариантной точки (Crx, Cor, Ga, An, Sp, L), которая расположена в области давления 20 кбар и температуры 1400 °С.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОНОВАРИАНТНЫХ РАВНОВЕСИЙ ЧАСТИ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ И ТРЕНД МАГМАТИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ РАСПЛАВОВ

На первый взгляд полученные результаты носят несколько абстрактный и теоретический характер по отношению к проблемам, исследуемым в геологии. Однако сопоставление этих результатов с другими данными, полученными ранее [Сурков, 1995], позволяет прояснить два конкретных и принципиально важных для глубинной петрологии вопроса:

- однозначно ответить на вопрос, какой вид имеет реакция эколгитизации,
- описать тренд эволюции магм щелочноземельной серии.

Таблица 5. Усредненные анализы фаз из экспериментов по исследованию моновариантного равновесия $L + Sp = Crx + Cor + (Ga)$

| Номер опыта | Фаза | Число анализов | мас. % | | | | | мол. % | | | | | форм. ед. | | | | |
|-------------|------|----------------|--------|-------|--------------------------------|------------------|-------|---------|---------|--------------------------------|------------------|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| | | | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Сумма | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Сумма | Ca | Mg | Al | Si | Сумма |
| | | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1 | 2 | 3 | 11.45 | 21.06 | 24.1 | 43.02 | 99.63 | 12.1713 | 31.1153 | 14.0739 | 42.6395 | 100 | 0.8553 | 2.1862 | 1.9777 | 2.996 | 8.0152 |
| P264 | Ga | 4 | 20.0 | 14.46 | 21.0 | 43.86 | 99.33 | 21.6051 | 21.7114 | 12.4971 | 44.1864 | 100 | 0.7664 | 0.7702 | 0.8851 | 1.5679 | 3.9895 |
| P264 | Cpx | 8 | 9.277 | 23.07 | 24.89 | 43.25 | 100.5 | 9.72049 | 33.636 | 14.3448 | 42.2987 | 100 | 0.6822 | 2.3606 | 2.0134 | 2.9685 | 8.0247 |
| P265 | Ga | 3 | 20.54 | 15.42 | 18.73 | 44.95 | 99.64 | 21.7959 | 22.7558 | 10.9361 | 44.5122 | 100 | 0.786 | 0.8206 | 0.7886 | 1.6053 | 4.0004 |
| P266 | Cpx | 3 | 0.428 | 27.44 | 69.71 | 1.85 | 99.43 | 0.544 | 48.5285 | 48.7328 | 2.19467 | 100 | 0.0109 | 0.9722 | 1.9526 | 0.044 | 2.9797 |
| P266 | Sp | 1 | 20.89 | 14.13 | 20.28 | 44.5 | 99.81 | 22.3993 | 21.0859 | 11.9783 | 44.5365 | 100 | 0.7982 | 0.7511 | 0.8519 | 1.5865 | 3.9876 |
| P267 | Cpx | 5 | 8.83 | 23.22 | 24.77 | 43.21 | 100.0 | 9.28628 | 33.9778 | 14.3275 | 42.4084 | 100 | 0.6514 | 2.3835 | 2.0101 | 2.9749 | 8.02 |
| P267 | Ga | 2 | 18.86 | 15.09 | 19.44 | 45.21 | 98.6 | 20.3354 | 22.6389 | 11.5286 | 45.4971 | 100 | 0.7239 | 0.8059 | 0.8208 | 1.6196 | 3.9701 |
| P267 | Cpx | 1 | 20.62 | 14.28 | 19.86 | 44.41 | 99.17 | 22.21 | 21.3893 | 11.7656 | 44.6351 | 100 | 0.7924 | 0.7632 | 0.8395 | 1.5926 | 3.9877 |
| P268 | Cpx | 5 | 9.222 | 23.0 | 24.53 | 43.36 | 100.1 | 9.69056 | 33.6192 | 14.1751 | 42.5151 | 100 | 0.6806 | 2.3612 | 1.991 | 2.9859 | 8.0186 |
| P268 | Ga | 5 | 18.49 | 17.74 | 16.04 | 47.17 | 99.43 | 19.2586 | 25.7025 | 9.18919 | 45.8497 | 100 | 0.7036 | 0.9391 | 0.6714 | 1.6751 | 3.9892 |
| P269 | Cpx | 3 | 0.252 | 28.0 | 69.67 | 1.53 | 99.45 | 0.31915 | 49.3417 | 48.5306 | 1.80855 | 100 | 0.0064 | 0.9924 | 1.9523 | 0.0364 | 2.9875 |
| P269 | Sp | 1 | 19.13 | 14.33 | 21.26 | 45.26 | 99.97 | 20.5739 | 21.4016 | 12.5922 | 45.4323 | 100 | 0.7234 | 0.7543 | 0.8843 | 1.5979 | 3.9599 |
| P269 | Cpx | 4 | 21.53 | 14.79 | 17.59 | 46.12 | 100.0 | 22.7039 | 21.7013 | 10.2021 | 45.3927 | 100 | 0.8216 | 0.7854 | 0.7384 | 1.6427 | 3.9881 |
| P269 | Cpx | 2 | 22.14 | 12.92 | 20.6 | 43.5 | 99.16 | 24.0565 | 19.5204 | 12.31 | 44.1131 | 100 | 0.8554 | 0.6942 | 0.8754 | 1.5686 | 3.9937 |
| P270 | Cpx | 5 | 0.389 | 27.77 | 70.05 | 2.26 | 100.5 | 0.48829 | 48.5019 | 48.362 | 2.64774 | 100 | 0.0098 | 0.9731 | 1.9406 | 0.0531 | 2.9766 |
| P270 | Sp | 1 | 17.11 | 16.32 | 20.57 | 47.28 | 101.3 | 17.9565 | 23.8394 | 11.8775 | 46.3266 | 100 | 0.6335 | 0.841 | 0.838 | 1.6343 | 3.9467 |
| P270 | Gl | 4 | 17.16 | 16.47 | 20.0 | 45.76 | 99.39 | 18.2969 | 24.4349 | 11.729 | 45.5392 | 100 | 0.6496 | 0.8675 | 0.8328 | 1.6168 | 3.9668 |
| P270 | xCpx | 1 | 17.56 | 16.11 | 19.86 | 45.63 | 99.16 | 18.7869 | 23.9716 | 11.6874 | 45.5541 | 100 | 0.6673 | 0.8516 | 0.8301 | 1.618 | 3.967 |
| P270 | Cpx | 3 | 0.087 | 28.41 | 70.16 | 0.446 | 99.1 | 0.11066 | 50.2787 | 49.0812 | 0.52946 | 100 | 0.0022 | 1.0122 | 1.9762 | 0.0107 | 3.0013 |
| P271 | Sp | 1 | 12.9 | 19.51 | 20.02 | 48.17 | 100.6 | 13.4397 | 28.2659 | 11.4707 | 46.8237 | 100 | 0.475 | 0.9994 | 0.8107 | 1.6548 | 3.9399 |
| P271 | Gl | 3 | 13.18 | 19.39 | 20.12 | 46.72 | 99.4 | 13.9001 | 28.4461 | 11.6708 | 45.9829 | 100 | 0.4925 | 1.008 | 0.8271 | 1.6294 | 3.957 |
| P271 | xCpx | 2 | 13.64 | 20.09 | 18.47 | 47.66 | 99.85 | 14.1701 | 29.0538 | 10.5544 | 46.2216 | 100 | 0.5081 | 1.0418 | 0.7569 | 1.6574 | 3.9642 |
| P271 | Cpx | 3 | 20.63 | 13.8 | 21.42 | 44.41 | 100.3 | 22.1676 | 20.6292 | 12.6594 | 44.5438 | 100 | 0.783 | 0.7287 | 0.8943 | 1.5734 | 3.9794 |
| P272 | Gl | 5 | 12.07 | 20.08 | 23.97 | 43.18 | 99.3 | 12.91 | 29.884 | 14.1023 | 43.1037 | 100 | 0.9044 | 2.0934 | 1.9757 | 3.0193 | 7.9928 |
| P273 | Ga | 3 | 22.03 | 12.69 | 20.88 | 43.6 | 99.2 | 23.9861 | 19.2116 | 12.5002 | 44.3021 | 100 | 0.85 | 0.6809 | 0.8859 | 1.5701 | 3.987 |
| P273 | Cpx | 4 | 2.36 | 25.42 | 63.27 | 8.65 | 99.7 | 2.92797 | 43.8819 | 43.1738 | 10.0163 | 100 | 0.0596 | 0.8939 | 1.7589 | 0.204 | 2.9165 |
| P274 | Sp | 1 | 10.47 | 22.05 | 24.25 | 43.3 | 100.1 | 11.0336 | 32.3271 | 14.0543 | 42.585 | 100 | 0.7758 | 2.2726 | 1.976 | 2.9938 | 8.0182 |
| P274 | Ga | 4 | 21.43 | 14.52 | 17.96 | 45.39 | 99.3 | 22.8319 | 21.5167 | 10.5211 | 45.1303 | 100 | 0.8244 | 0.777 | 0.7597 | 1.6295 | 3.9906 |
| P274 | Cpx | 4 | 21.28 | 11.93 | 21.71 | 44.29 | 99.21 | 23.3442 | 18.2097 | 13.0989 | 45.3473 | 100 | 0.8165 | 0.6369 | 0.9163 | 1.5861 | 3.9558 |
| P275 | Cpx | 1 | 0.38 | 27.64 | 69.67 | 1.18 | 98.87 | 0.48557 | 49.1427 | 48.9644 | 1.4073 | 100 | 0.0146 | 1.4792 | 2.9476 | 0.0424 | 4.4838 |
| P276 | Sp | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|------|---|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| P276 | | Ga | 2 | 9.45 | 22.25 | 24.12 | 43.24 | 99.06 | 10.0499 | 32.9239 | 14.108 | 42.9182 | 100 | 0.7047 | 2.3086 | 1.9785 | 3.0094 | 8.0013 |
| P276 | | Crpx | 1 | 15.67 | 13.78 | 22.2 | 48.24 | 99.89 | 17.0182 | 20.8233 | 13.2607 | 48.8979 | 100 | 0.5821 | 0.7122 | 0.9071 | 1.6725 | 3.8739 |
| P276 | | xCrpx | 2 | 15.81 | 13.49 | 21.64 | 47.09 | 98.03 | 17.4837 | 20.7548 | 13.1581 | 48.6033 | 100 | 0.5997 | 0.7119 | 0.9027 | 1.6672 | 3.8815 |
| P276 | | Gl | 4 | 20.02 | 15.5 | 17.73 | 45.6 | 98.84 | 21.3228 | 22.9668 | 10.3851 | 45.3253 | 100 | 0.7703 | 0.8297 | 0.7503 | 1.6373 | 3.9875 |
| P277 | | Sp | 1 | 0.091 | 28.32 | 69.96 | 0.42 | 98.79 | 0.11612 | 50.2828 | 49.1009 | 0.50022 | 100 | 0.0035 | 1.5183 | 2.9653 | 0.0151 | 4.5022 |
| P277 | | Ga | 2 | 8.48 | 23.73 | 24.38 | 43.11 | 99.69 | 8.91373 | 34.6999 | 14.0923 | 42.2941 | 100 | 0.6274 | 2.4425 | 1.9839 | 2.9771 | 8.031 |
| P277 | | Crpx | 3 | 15.86 | 18.13 | 19.21 | 46.73 | 99.93 | 16.6524 | 26.475 | 11.0915 | 45.7812 | 100 | 0.5949 | 0.9458 | 0.7924 | 1.6354 | 3.9684 |
| P278 | | Crpx | 3 | 19.08 | 13.91 | 21.67 | 45.41 | 100.1 | 20.5769 | 20.8621 | 12.8536 | 45.7073 | 100 | 0.7203 | 0.7304 | 0.8997 | 1.5998 | 3.9503 |

Примечание. xCrpx — закалочная фаза (клинопироксен).

Реакция эклогитизации (рис. 3) впервые была экспериментально установлена Куширо и Йодером [Kushiro, Yoder, 1966] в модельной системе $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ и впоследствии воспроизведена с использованием «реальных» составов (т.е. материала из природных образцов) в работах Грина и Рингвуда [Green, Ringwood, 1967a,б], Ито и Кеннеди [Ito, Kennedy, 1971]. Во всех этих работах она трактовалась как реакция появления «первого» (по давлению) граната существенно пиропового состава. Границы устойчивости чистого пироба были впервые исследованы Ф. Бойдом [Boyd, England, 1959] и полностью описаны А.М. Дорошевым [Дорошев, Малиновский, 1974, 1975]. Поле его устойчивости расположено при значительно более высоких давлениях.

Поэтому, ссылаясь на результаты указанных выше работ, реакцию образования магнезиального граната часто записывали как $\text{Ga} = \text{Crpx} + \text{Orpx} + \text{An} + \text{Sp}$ [Дубровский, 1998].

Такая трактовка подразумевает, что состав граната в дивариантной ассоциации ($\text{Crpx} + \text{Orpx} + \text{Ga}$) должен быть более кальциевым, чем состав $\text{Pyr} 83.33$ мол. % и $\text{Gross} 16.67$ мол. %. Эта точка составов соответствует пересечению плоскости энстатит—шпинель—анортит и сечения пироп—гроссуляр ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 5\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} = 3\text{MgAl}_2\text{O}_4 + 3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 6\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$).

Другой вариант этого моновариантного равновесия ($\text{Crpx} + \text{Ga} = \text{Orpx} + \text{An} + \text{Sp}$) был предложен А. Томпсоном [Thompson, 1979] и использован в наших работах [Сурков, 1995; Сурков, Кузнецов, 1996]. Этот вариант (см. рис. 3) соответствует появлению конноды гранат—клинопироксен в этой реакции, при этом гранат имеет заметно более магнезиальный состав, нежели в предыдущем случае.

Экспериментальные исследования твердых растворов фаз, сосуществующих в ассоциации ($\text{Ga} + \text{Crpx} + \text{Orpx}$), показывают [Сурков, Кузнецов, 1996], что в ней состав граната всегда имеет некоторый избыток пироповой составляющей и находится в магнезиальной области составов от плоскости энстатит—шпинель—анортит. Однако значительные твердые растворы энстатита как в сторону диопсида (до 10 мол. %), так и в сторону корунда (практически до состава пироба 25 мол. % Al_2O_3), не позволяют сделать однозначный вывод о характере обсуждаемой реакции.

В области низких давлений, от атмосферного до давления, соответствующего неинвариантному равновесию ($\text{Ga}, \text{Crpx}, \text{Orpx}, \text{An}, \text{Sp}, \text{L}$), строение ликвидуса фазовой диаграммы системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ одинаково как для варианта с реакцией эклогитизации при ее виде ($\text{Ga} = \text{Crpx} + \text{Orpx} + \text{An} + \text{Sp}$), так и при виде ($\text{Crpx} + \text{Ga} = \text{Orpx} + \text{An} + \text{Sp}$).

При более высоких давлениях для согласования топологии системы с неинвариантным равновесием ($\text{Ga}, \text{Crpx}, \text{Orpx}, \text{Fo}, \text{Sp}, \text{L}$) вариант с реакцией эклогитизации вида ($\text{Ga} = \text{Crpx} + \text{Orpx} + \text{An} + \text{Sp}$) требует предположения о существовании нескольких сингулярных равновесий в области плавления, и в этом варианте полностью отсутствует возможность топологического согласования с лучами, выходящими из неинвариантного равновесия ($\text{Crpx}, \text{Cor}, \text{Ga}, \text{An}, \text{Sp}, \text{L}$) (рис. 4), существование которого установлено в нашей работе. На этом основании следует заключить, что реакцию эклогитизации следует записывать исключительно как ($\text{Crpx} + \text{Ga} = \text{Orpx} + \text{An} + \text{Sp}$), и состав граната, участвующего в ней, более магнезиальный, нежели точка пересечения плоскости ортопироксен—плаггиоклаз—шпинель с сечением пироп—гроссуляр.

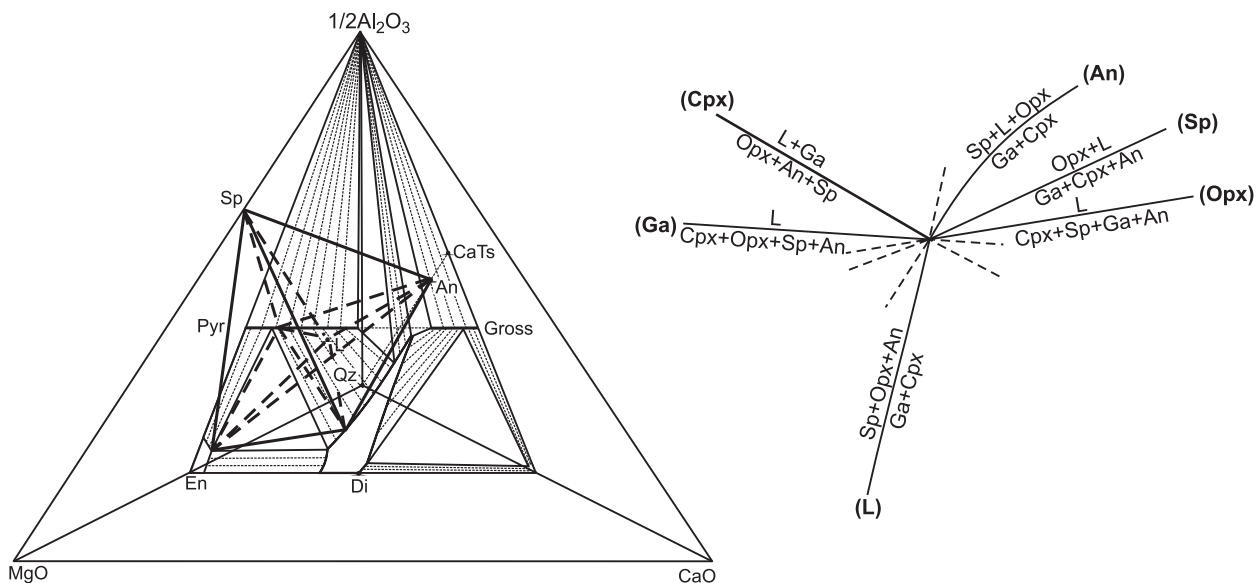


Рис. 3. Фазовый объем невариантного равновесия (Cpx, Ga, Opx, Sp, An, L).

Полученные в этой работе экспериментальные результаты позволили не только доказать существование невариантного равновесия (Cpx, Cor, Ga, An, Sp, L) и окончательно определить вид реакции «эклогитизации» ($Cpx + Ga = Opx + An + Sp$), но и позволяют провести анализ ликвидусных соотношений в исследованной части системы $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$.

Так, из точки невариантного равновесия (Cpx, Cor, Ga, An, Sp, L) в сторону низких давлений направлен луч моновариантной реакции $L = Cpx + (Ga) + An + Sp$, а из точки невариантного равновесия (Cpx, Opx, Ga, An, Sp, L) в сторону высоких давлений выходит луч этой же реакции. Таким образом, на этом участке фазовой диаграммы системы прослеживается непрерывная серия эвтектических моновариантных равновесий $L = Cpx + Opx + Fo + An$ (от 1 атм до 8 кбар); $L = Cpx + Opx + An + Sp$ (от 8 кбар до 16 кбар); $L = Cpx + (Ga) + An + Sp$ (от 16 кбар до 20 кбар); $L = Cpx + Cor + (Ga) + An$ (от 20 кбар и выше) (рис. 5).

Такая серия эвтектик имеет особое значение для понимания путей эволюции магматических расплавов. Базовые вопросы этого процесса в зависимости от химического состава магматического расплава и динамики развития магматического очага рассмотрены в работе [Сурков, Зинчук, 2001].

В этой серии эвтектик для давлений от атмосферного до 8—9 кбар (невариантное равновесие (An, Fo, Opx, Cpx, Sp, L)) в области температур между солидусом и ликвидусом, в зависимости от химического состава кристаллизуются ассоциации типа: An + Fo, An + Opx, An + Cpx, Fo + Opx, Fo + Cpx, Opx + Cpx, An + Fo + Opx, An + Fo + Cpx, An + Opx + Cpx, Fo + Opx + Cpx, An + Fo + Opx + Cpx и отдельные фазы An, Fo, Opx, Cpx.

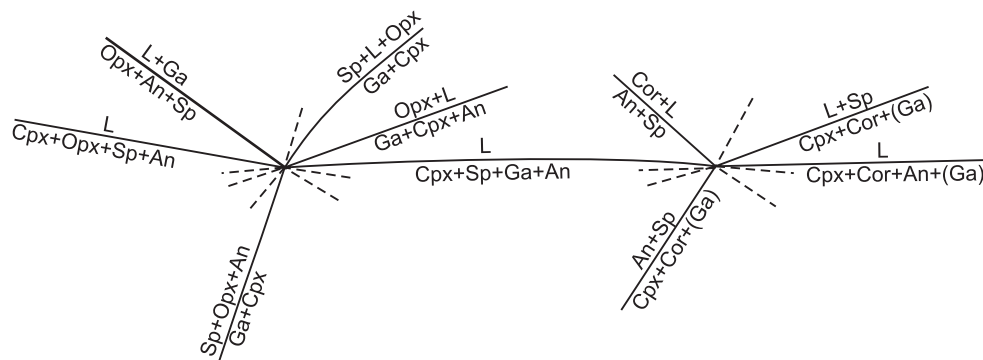


Рис. 4. Схема топологии моновариантных реакций, исходящих из точек невариантных равновесий (Cpx, Ga, Opx, Sp, An, L) и (Sp, An, Cpx, (Ga), Cor, L).

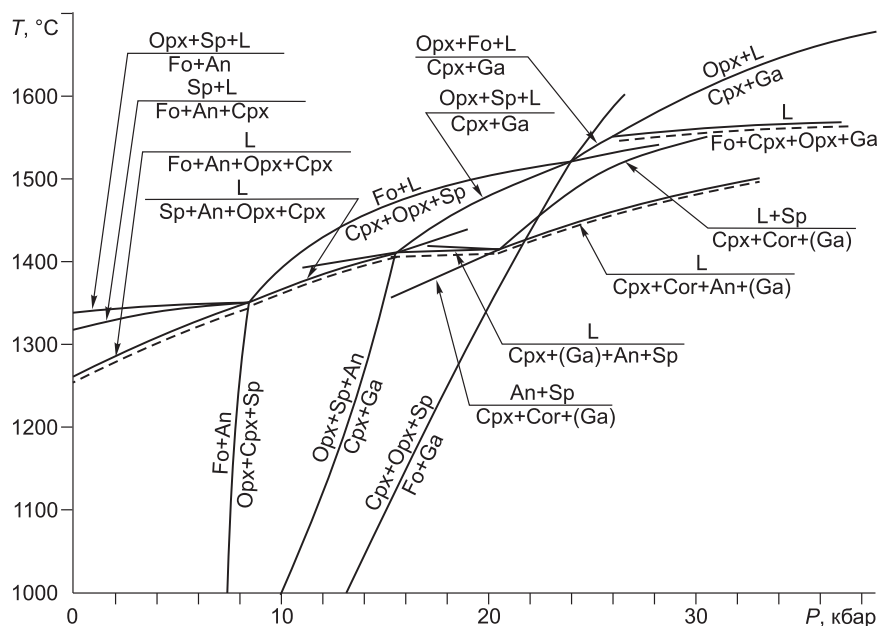


Рис. 5. Топология не- и моновариантных равновесий в форстеритнормативной и корунднормативной частях системы $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

Штриховыми линиями выделены эвтектические моновариантные равновесия.

При давлениях выше от невариантного равновесия (An, Fo, Opх, Cpx, Sp, L) (8—9 кбар) и до давлений 15—16 кбар (невариантное равновесие (Ga, Opх, Cpx, An, Sp, L) кристаллизуются ассоциации: An + Opх, An + Cpx, An + Opх, An + Sp, Opх + Cpx, Cpx + Sp, An + Opх + Cpx, An + Opх + Sp, Opх + Cpx + Sp, An + Opх + Cpx + Sp и фазы An, Opх, Cpx, Sp.

При давлениях выше от невариантного равновесия (Ga, Opх, Cpx, An, Sp, L) (15—16 кбар) и до давлений приблизительно 20 кбар (невариантное равновесие (An, Ga, Cor, Cpx, Sp, L) кристаллизуются ассоциации: An + Ga, An + Cpx, An + Sp, Ga + Cpx, Cpx + Sp, Ga + Sp, An + Ga + Cpx, An + Ga + Sp, An + Cpx + Sp, Ga + Cpx + Sp и An + Ga + Cpx + Sp и фазы An, Ga, Cpx, Sp.

При давлениях выше от невариантного равновесия (An, Ga, Cor, Cpx, Sp, L) (20 кбар) кристаллизуются ассоциации: An + Ga, An + Cor, An + Cpx, Ga + Cor, Ga + Cpx, Cor + Cpx, An + Ga + Cor, An + Ga + Cpx, An + Cor + Cpx, Ga + Cor + Cpx, An + Ga + Cor + Cpx и фазы An, Ga, Cor, Cpx.

Все эти ассоциации широко представлены в эффузивных и дайковых сериях пород щелочноземельной серии в виде парагенезисов из ксенолитов или в качестве минералов, формирующих мегакристы.

Следует отметить, что состав расплава на этой серии эвтектик существенно меняется с повышением давления в сторону кальциевых и глиноземистых составов, т.е. от типичных габброидных (базальтовых) до кальций-глиноземистых, анортозитовых составов.

Очевидно, что при подъеме к поверхности природные магмы постепенно переходят в области литосферы, обладающие более низкой температурой. Если не происходит катастрофического, т.е. быстрого прорыва магматического расплава к поверхности, то в промежуточных очагах и магмопроводящих каналах происходит постоянная кристаллизация субликвидусных фаз. В результате оседания кристаллов или, в редких случаях, всплывания (анортит в интервале давлений 10—30 кбар) происходит их отделение от магмы. Состав остаточного расплава в этом процессе меняется в сторону эвтектического, т.е. расплава с минимальной температурой плавления. Поэтому при плавном подъеме магматического расплава в условиях, когда кристаллы и расплав находятся в состоянии, близком к термодинамическому равновесию, состав расплава приближается к эвтектическому. Поэтому эволюция магматического расплава в условиях понижающихся значений давления и температуры последовательно протекает приблизительно по составам тех расплавов, которые существуют в этих эвтектиках. Серия последовательных эвтектик составляет тренд кристаллизации, что приводит к формированию соответствующего ей набора горных пород, проявленного в природе в виде магматических серий.

Дополнительные компоненты входят в вышеперечисленные фазы в качестве изоморфных составляющих. В зависимости от содержания оксидов железа и хрома, шпинель в горных породах представле-

на магнезиошпинелью, хромитом. Наличие щелочей изменяет состав плагиоклаза и клинопироксена в сторону щелочных разновидностей и т. д.

Такие компоненты, как вода и двуокись углерода, не играют главенствующей роли в генезисе пород щелочноземельной серии.

Серьезное влияние на эволюцию магматических расплавов «летучие» компоненты могут оказать, если их содержание достаточно для образования предельно насыщенных этими компонентами расплавов, т.е. эвтектик. Согласно данным экспериментальных исследований [Eggler, Rosenhauer, 1978; Bohlen et al., 1982; Perchuk, Kushiro, 1985], содержание воды и углекислоты в эвтектических расплавах силикат—летучий компонент весьма значительно: например, воды содержится в расплаве диопсида до 30 мас. %, а двуокиси углерода — до 2.5 мас. %. Такое количество «летучих» компонентов в магматическом расплаве при его раскристаллизации должно вызывать значительные вторичные изменения вмещающих пород и самих магматических пород. Процесс застывания магматического тела проходил бы стадию массовой амфиболитизации, карбонатизации, серицитизации и серпентинизации и т.п. Для полного превращения всего магматического тела в мономинеральный амфиболит хватит 2—3 % воды. Согласно известным экспериментальным данным, такое количество водного компонента в расплаве лишь незначительно (на 10—20 °С) понизит температуры плавления и практически не окажет влияния на солидусные фазовые взаимоотношения. Кроме того, при значительном содержании летучих компонентов (более 2—3 мас. %), в области давлений около 2—5 кбар происходит их отделение от расплава в виде газовой фазы, а алюмосиликатная часть магмы застывает, т.е. высокие содержания летучих компонентов в магме исключают эффузивный магматизм. Именно поэтому легколетучие компоненты не могут иметь определяющего значения при генерации магм, порождающих серии горных пород, в которых представлены эффузивные разновидности. Исходная генерация и дальнейшая эволюция магм щелочноземельной серии происходят без значительного влияния легколетучих компонентов и близки к «сухой» модели. В связи с этим модель на основе системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ может считаться достаточно адекватной при рассмотрении происхождения пород щелочноземельной серии.

Следует еще раз отметить, что перечисленные выше ассоциации субсолидуса модельной системы характерны для пород именно щелочноземельной серии. Они слагают основную массу массивов, встречаются в виде ксенолитов среди пород дайковой фации и в эффузивах. Минералы субсолидуса характерны в качестве мегакристов в потоках базальтов.

Выделения мегакристов следует выделить особо. Мегакристы оливина, плагиоклаза, шпинеллоидов, пироксенов, граната и корунда [Ходанович и др., 1984; Геншафт, 1987; Геншафт, Салтыковский, 1990; Smirnov, 2006] можно обнаружить в значительной части эффузивов, сопровождающих породы щелочноземельной формации. Форма выделения, вид этих мегакристов и их состав контрастируют с базальтами, в которых их обнаруживают. Некоторые мегакристы окружены слабовыраженной оболочкой базальтового вещества. Это позволяет предполагать их ксеногенное происхождение по отношению к окружающим их базальтам. Однако исключительно совершенная структура и монокристалличность образцов не дают оснований считать эти мегакристы обломками вмещающих пород.

На основании результатов исследования части ликвидуса системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$, установленных в нашей работе, следует заключить, что мегакристы, встречаемые в породах, не являются ксенокристами, т.е. чуждыми минералами по отношению к выносящему их на поверхность расплаву, а непосредственно генетически связаны с этим расплавом. Мегакристы зарождаются и формируются в том же расплаве, который впоследствии выносит их на поверхность. Формирование этих мегакристов происходило в промежуточных очагах при температурах и давлениях, отличающихся от условий их транспортировки и окончательной закалки, а их сохранность связана с большим размером кристаллитов, который не позволил им полностью раствориться в расплаве при транспортировке к поверхности.

Наличие соответствующего набора минералов в виде мегакристов является парагенетическим признаком для щелочноземельного магматизма и наряду с ксенолитами позволяет использовать их для реконструкций особенностей динамики развития магматического процесса конкретного геологического объекта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов экспериментальных исследований и топологического анализа участка фазовой диаграммы системы $\text{CaO—MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ окончательно установлен вид «реакции эклогитизации». Эта реакция представляет собой реакцию образования конноды клинопироксен—гранат и имеет вид $\text{Crx} + \text{Ga} = \text{Orx} + \text{An} + \text{Sp}$.

Прослежена непрерывная серия эвтектических моновариантных равновесий $\text{L} = \text{Crx} + \text{Orx} + \text{Fo} + \text{An}$ (от 1 атм до 8 кбар); $\text{L} = \text{Crx} + \text{Orx} + \text{An} + \text{Sp}$ (от 8 кбар до 16 кбар); $\text{L} = \text{Crx} + (\text{Ga}) + \text{An} + \text{Sp}$ (от 16 до 20 кбар); $\text{L} = \text{Crx} + \text{Cor} + (\text{Ga}) + \text{An}$ (от 20 кбар и выше), имеющая фундаментальный характер. В

соответствии с этой серией эвтектических реакций прослеживается тренд кристаллизации магматических расплавов, сопоставимых с породами щелочноземельной серии.

Показано, что наборы субсолидусных фаз соответствуют минералогическому составу куммулятов и фенокристов, встречаемых в эффузивных и дайковых разновидностях пород щелочноземельной серии.

ЛИТЕРАТУРА

А.с. № 1762458 СССР. Ячейка устройства для создания высокой температуры при сверхвысоком давлении / Сурков Н.В. Оpubл. в Б.И., 1992, т. 34, с. 213.

Геншафт Ю.С. Мегакристаллы высокого давления — проблемы петрологии // Глубинные ксенолиты и строение литосферы. М., Наука, 1987, с. 166—178.

Геншафт Ю.С., Салтыковский А.Я. Каталог включений глубинных пород и минералов в базальтах Монголии. М., Наука, 1990, 71 с.

Годовиков А.А., Смирнов С.А., Малиновский И.Ю., Ран Э.Н., Паньков М.С., Росинский Г.А., Токмин Б.П. Аппарат для создания давления до 40 кбар при температурах до 1700 °С // Приборы и техника эксперимента, 1971, № 6, с. 159—160.

Дорошев А.М., Малиновский И.Ю. Топологический анализ системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ // Экспериментальные исследования по минералогии (1972—1973) / Под ред. А.А. Годовикова, В.С. Соболева, Б.А. Фурсенко. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1974, с. 81—86.

Дорошев А.М., Малиновский И.Ю. Начало границы плавления пироба // Экспериментальные исследования по минералогии (1974—1975) / Под ред. В.С. Соболева, А.А. Годовикова, И.Ю. Малиновского, Г.Ю. Шведенкова. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975, с. 101—103.

Дубровский М.И. Тренды дифференциации оливиннормативных магм нормальной щелочности и соответствующие им природные серии / Ред. А.Н. Виноградов. Апатиты, Изд-во Кольского научного центра РАН, 1998, 336 с.

Сурков Н.В. Экспериментальное исследование устойчивости и плавления дивариантных ассоциаций в форстеритнормативной части системы $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ в связи с петрологией верхней мантии // Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Под ред. Н.В. Соболева. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ СО РАН, 1995, т. 11, вып. 832, с. 27—43.

Сурков Н.В., Кузнецов Г.Н. Экспериментальное исследование устойчивости твердых растворов клинопироксенов в ассоциации $Srx + Orx + Ga$ системы $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (12), с. 18—25.

Сурков Н.В., Гартвич Ю.Г. Экспериментальное исследование фазовых равновесий в сечении пироп—гроссуляр при давлении 30 кбар // Петрология, 2000, т. 8, № 1, с. 95—107.

Сурков Н.В., Зинчук Н.Н. Устойчивость глубинных парагенезисов, процессы магнообразования и происхождение кимберлитов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж, Воронеж. гос. ун-т, 2001, с. 101—135.

Сурков Н.В., Гартвич Ю.Г., Изох О.П. Устойчивость и фазовые взаимоотношения нестехиометричных клинопироксенов в сечении диопсид—«Са-молекула Эскола» при высоких давлениях // Геохимия, 2007, № 6, с. 632—642.

Ходанович П.Ю., Смирнова О.К., Асташков Г.Ф., Ащепков И.В., Юдин Б.Н., Пивень В.А. Геология и полезные ископаемые Джидинского рудного района // Джидинский рудный район (проблемы развития и освоения минеральных ресурсов). Новосибирск, Наука, 1984, с. 21—35.

Bohlen S.R., Boettcher A.L., Wall V.J. The system albite— H_2O-CO_2 : a model for melting and activities of water at high pressures // Amer. Miner., 1982, v. 67, № 5—6, p. 451—462.

Boyd F.R., England J.L. Pyrope // Year Book, Carnegie Inst. Wash., 1959, v. 58, p. 83-87.

Boyd F.R., England J.L. Apparatus for phase-equilibrium measurements at pressures up to 50 kilobars and temperatures up to 1750 °C // J. Geophys. Res., 1960, v. 65, № 2, p. 741—748.

Eggler D.H., Rosenhauer M. Carbon dioxide in silicate melts: II. Solubilities of CO_2 and H_2O in $CaMg-Si_2O_6$ (diopside) liquids and vapors at pressures to 40 kb // Amer. J. Sci., 1978, v. 278, № 1, p. 64—94.

Green D.H., Ringwood A.E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications // Geochim. Cosmochim. Acta, 1967a, v. 31, № 5, p. 767—833.

Green D.H., Ringwood A.E. The stability fields of aluminous pyroxene peridotite and garnet peridotite and their relevance in upper mantle structure // Earth Planet. Sci. Lett., 1967b, v. 3, № 1, p. 151—160.

Hensen B.J. The transition from pyroxene granulite facies to garnet clinopyroxene granulite facies. Experiments in system $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ // Contr. Miner. Petrol., 1981, v. 76, № 3, p. 234—243.

Hytonen K., Schairer J.F. The system enstatite—anorthite—diopside // Yearbook, Carnegie Inst. Wash., 1960, v. 59, p. 71—72.

Hytonen K., Schairer J.F. The plane enstatite-anorthite-diopside and its relation to basalts // Yearbook, Carnegie Inst. Wash., 1961, v. 60, p. 125—141.

Ito K., Kennedy G.C. An experimental study of the basalt-garnet granulite-eclogite transition // The structure and physical properties of the Earth's crust, Amer. Geophys. Union, Geophys. Monograph 14. 1971, p. 303—314.

Kushiro I., Yoder H.S.Jr. Anortite-forsterite and anortite-enstatite reactions and their bearing on the basalt-eclogite transformation // J. Petrol., 1966, v. 7, № 3, p. 337—362.

Mirvald P.W., Getting I.C., Kennedy G.C. Low-friction cell for piston-cylinder high-pressure apparatus // J. Geophys. Res., 1975, v. 86, № 11, p. 1519—1525.

Osborn E.F., Tait D.B. The system diopside-forsterite-anorthite // Amer. J. Sci., 1952, Bowen vol., part 2, p. 413—433.

Perchuk L.L., Kushiro I. Experimental study of the system alkali basalt-water up to pressure 20 kbar in respect to estimation of H₂O content in the original magmas beneath island arcs // Geologicky Zbornik-Geologica Carpathica., 1985, v. 36, № 3, p. 359—368.

Presnall D.C., Dixon S.A., Dixon J.R., O'Donnell T.H., Benner N.L., Schrock R.L., Dycus D.W. Liquidus phase relations on join diopside-forsterite-anorthite from 1 atm to 20 kbar: their bearing on the generation and crystallization of basaltic magma // Contr. Miner. Petrol., 1978, v. 66, № 2, p. 203—220.

Smirnov S.Z., Izokh A.E., Kovyazin S.V., Mashkovtsev R.I., Hoa T.T., Phuong N. Thi, Kalinina V.V., Pospelova L.N. Inclusions in Dak Nong placer sapphires, central Viet Nam: conditions of corundum crystallization in the continental crust // J. Geol., 2006, Series B, № 28, p. 58—70.

Thompson A.B. Metamorphism in a model mantle. 1. Predictions of *P-T-X* relations in CaO—Al₂O₃—MgO—SiO₂ // The mantle sample: inclusions in kimberlites and other volcanics. 1979, v. 2, p. 15—28.

*Рекомендована к печати 1 марта 2011 г.
В.С. Шацким*

*Поступила в редакцию 4 мая 2010 г.,
после доработки — 8 ноября 2010 г.*