

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Д.С. КОРЖИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

**X ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
МИНЕРАЛОГИЯ,
ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ»**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

28-30 октября 2019 г.

Черноголовка

УДК 550.4.02

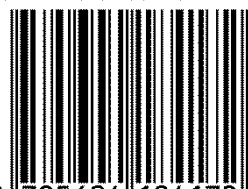
Х ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ»: Сборник материалов. Черноголовка. 2019 г. 150 с.

В сборнике представлены материалы Х Всероссийской школы молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия» (г.Черноголовка, 28-30 октября 2019 г.). Школа организована на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук. В сборнике обсуждаются общие и частные проблемы экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Уделяется внимание условиям зарождения и эволюции магм, минеральным равновесиям в силикатных и рудных системах, исследованиям гидротермальных и флюидных систем, синтезу макро- и нанокристаллов, технической петрологии и материаловедению.

Все материалы представлены в авторском варианте

ISBN 978-5-6041841-7-2

ISBN 978-5-6041841-7-2



9 785604 184172

©ИЭМ РАН

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ ШКОЛЫ:

Председатель организационного комитета:

Шаповалов Ю.Б., член-корреспондент РАН, д.г.-м.н., ИЭМ РАН

Заместитель председателя:

Сафонов О.Г., профессор РАН, д.г.-м.н., ИЭМ РАН

Сопредседатели организационного комитета:

Ковальская Т.Н., к.г.-м.н., с.н.с. ИЭМ РАН

Осадчий Е.Г., д.х.н., зам. директора ИЭМ РАН

Ученый секретарь:

Варламов Д.А. - с.н.с. ИЭМ РАН

Программный комитет:

председатель - Сафонов О.Г., д.г.м.н., ИЭМ РАН

зам председателя- Ковальская Т.Н., к.г.-м.н., ИЭМ РАН

Члены: Бутвина В.Г., к.г.-м.н., ИЭМ РАН

Воронин М.В., к.х.н., ИЭМ РАН

Костюк А.В., к.г.-м.н., ИЭМ РАН

Сеткова Т.В., к.х.н., ИЭМ РАН

Ханин Д.А., к.г.-м.н., ИЭМ РАН

Члены технического оргкомитета:

Ханин Д.А., к.г.-м.н., н.с. ИЭМ РАН

Костюк А.В., к.г.-м.н., с.н.с. ИЭМ РАН

Сеткова Т.В., к.х.н., с.н.с. ИЭМ РАН

Воронин М.В., к.х.н., с.н.с. ИЭМ РАН

Калинин Г.М., м.н.с. ИЭМ РАН

Адрес оргкомитета: Институт экспериментальной минералогии РАН

142432, г.Черноголовка, Московская обл., ул. акад.Осипьяна, д.4

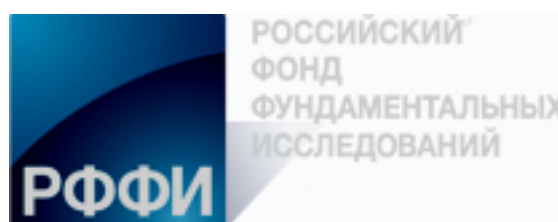
Тел. (49652) 25857, факс (49652) 49687

e-mail: school2019@iem.ac.ru, tatiana76@iem.ac.ru,

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Российский фонд фундаментальных исследований,

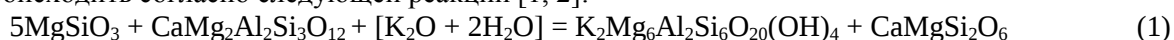
Грант № 19-05-20127 (научные мероприятия)



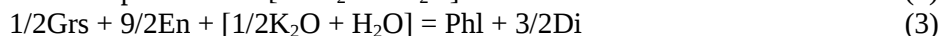
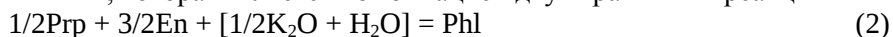
ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИЙ ФЛОГОПИТИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ОРТОПИРОКСЕН-ГРАНАТ + H₂O-KCl В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОБЛЕМЕ МОДАЛЬНОГО МАНТИЙНОГО МЕТАСОМАТОЗА. ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ 3 И 5 ГПА.

*Лиманов Е.В., Бутвина В.Г., Сафонов О.Г., Ван К.В., Варламов Д.А.
ИЭМ РАН (г. Черногловка), limanov.ev@iem.ac.ru*

Ксенолиты мантийных пород подвергаются многочисленным изменениям на протяжении всего времени своего существования. Помимо позднего кимберлитового метасоматоза, мантийные породы подвержены более раннему, мантийному метасоматозу, в ходе которого происходит генерация нетипичных для первичного перидотитового парагенезиса минералов (например, флогопита, амфибола, титанита, ильменита, апатита, карбонатов, сульфидов и т. д.). Активности вполне подвижных компонентов играют роль интенсивных параметров, которые контролируют реакции, протекающие в ходе метасоматоза. В дополнение к H₂O и CO₂, роль вполне подвижных компонентов могут выполнять щелочные компоненты – K₂O и Na₂O, об активном участии которых свидетельствуют многочисленные минералогические и геохимические данные [6]. Флогопит является типичным минеральным индикатором модального мантийного метасоматоза, а также важным контейнером щелочных и летучих компонентов в верхней мантии [3]. Формирование флогопита может происходить согласно следующей реакции [1, 2]:



или $5\text{En} + \text{Grt} + [\text{K}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}] = \text{Phl} + \text{Di}$, которая является комбинацией двух граничных реакций



В этих модельных реакциях щелочной компонент представлен в виде оксида K₂O. В природе же щелочные компоненты растворяются в жидкостях в форме различных солей, среди которых галогениды играют особенно важную роль [3]. Добавление небольших количеств галогенов типа F и Cl значительно повышает стабильность флогопита, сосуществующего с расплавом во время мантийного плавления [4]. Приведённые реакции воспроизводят процесс постепенного превращения лерцолитов и гарцбургитов верхней мантии через флогопит-содержащие перидотиты во флогопитовые верлиты. Подобные ксенолиты хорошо известны в кимберлитах [например, 8].

В ходе модального мантийного метасоматоза состав мантии становится более неоднородным. В случае плавления метасоматизированных областей мантии могут формироваться расплавы, необходимые для щелочного магматизма [5].

Изучение реакций, ответственных за образование флогопита в мантийных породах во время модального мантийного метасоматоза, является ключом к пониманию механизма данного процесса. Экспериментально установленные закономерности изменений минеральных ассоциаций и состава минералов от активности K и Na во флюидах могут быть применимы как для оценки активности K и Na, так и для определения составов самих жидкостей.

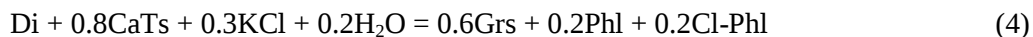
Данная работа посвящена экспериментальному исследованию систем пироп – энстатит + H₂O – KCl (соответствует реакции 2), гроссуляр – пироп – энстатит + H₂O – KCl (соответствует реакции 3), а также кноррингит – пироп – энстатит + H₂O – KCl. В качестве исходного материала использовалась смесь гелей пироба, гроссуляра и кноррингита, порошков брусита и кварца. KCl добавлялся для получения требуемого исходного $X_{\text{KCl}} = \text{KCl} / (\text{KCl} + \text{H}_2\text{O})$ (0.05, 0.1, 0.2, 0.4). Во всех системах были проведены эксперименты при давлении 5 ГПа и температуре 1000°C. В системе пироп – энстатит + H₂O-KCl также были проведены эксперименты при температурах 900 и 1250°C. В системе гроссуляр – пироп – энстатит + H₂O-KCl дополнительно были проведены экспериментальные исследования при давлении 3 ГПа и 900°C. Исследования проводились с использованием аппарата высокого давления «наковальня с лункой-торроид» NL-13T для моделирования P-T-условий верхней мантии в физико-химическом эксперименте. Аналитические исследования экспериментальных продуктов проводились с использованием электронного микроскопа CamScan MV2300 (VEGA TS 5130MM), оборудованного EDS INCA Energy 350 и Tescan VEGA-II XMU, оснащенного EDS INCA Energy 450 и WDS Oxford INCA Wave 700. Работа проведена в Институте экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН (ИЭМ РАН).

В системе пироп – энстатит + H₂O-KCl (ПЕН) при температуре 1250°C присутствует большое количество расплава, флогопит не образуется, что свидетельствует о невозможности воспроизведения метасоматических процессов при данных условиях. При температурах 900 и 1000°C

при $X_{\text{KCl}} = 0$ в системе образуются пироп и Al-содержащий энстатит. В системе также появляются продукты закалки, что свидетельствует о наличии небольшого количества расплава. Флогопит начинает образовываться при $X_{\text{KCl}} = 0.1$. При $X_{\text{KCl}} = 0.1$ и температуре 900°C , а также при $X_{\text{KCl}} = 0.2$ и температуре 1000°C среди продуктов экспериментов обнаружен кианит. Количество пироба и энстатита уменьшается с увеличением X_{KCl} во флюиде (согласно реакции 2), так что при $X_{\text{KCl}} = 0.4$ среди продуктов экспериментов преобладает флогопит, а пироп и энстатит редки (при 900°C) или отсутствуют (при 1000°C).

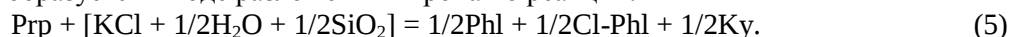
В системе грессуляр – пироп – энстатит + H_2O – KCl (ГРЕН) при $X_{\text{KCl}} = 0$ образуются гранат (с $X_{\text{Grs}} \sim 0.03 - 0.04$), Al-содержащий энстатит и диопсид. В системе также появляется небольшое количество расплава. В экспериментах проведённых при температуре 1000°C и давлении 5 ГПа диопсид исчезает из продуктов опытов при $X_{\text{KCl}} = 0.05$, что отражается на составе граната, увеличивая его X_{Grs} до $0.24 - 0.26$. Диопсид вновь появляется среди продуктов экспериментов при $X_{\text{KCl}} = 0.1$, одновременно с этим в системе начинает образовываться флогопит. Количество энстатита и граната в системе уменьшается с увеличением X_{KCl} во флюиде (согласно реакции 3), так что при $X_{\text{KCl}} = 0.4$ энстатит и гранат отсутствуют, а в системе преобладают флогопит и диопсид.

Состав гранатов в данной системе контролируется реакциями 2 и 3, что описаны ранее. При малых количествах солевого компонента во флюиде в системе доминирует реакция 2, что приводит к увеличению X_{Grs} в гранате. При больших количествах соли во флюиде в системе начинает доминировать реакция 3, что приводит к генерации диопсида, а также уменьшению X_{Grs} в гранате. Увеличение X_{Grs} в гранате, а также исчезновение Di при $X_{\text{KCl}} = 0.05$ может также объясняться реакцией:



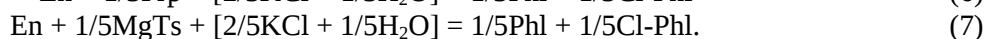
В системе кноррингит – пироп – энстатит + H_2O – KCl (КРЕН) при $X_{\text{KCl}} = 0$ образуются гранат (с $X_{\text{Knr}} \sim 0.08 - 0.09$) и Al-содержащий энстатит. В системе также обнаружены закалочные продукты, свидетельствующие о наличии в ней небольшого количества расплава. Флогопит начинает формироваться при $X_{\text{KCl}} = 0.1$. При $X_{\text{KCl}} = 0.2$ в системе присутствует Cr-содержащий кианит (содержание Cr_2O_3 до 7 мас.%). Появление кианита сопровождается снижением X_{Knr} в гранате до значений $0.04 - 0.05$. Cr-содержащая шпинель не образуется. С увеличением X_{KCl} во флюиде в системе отмечены следующие закономерности: содержание Cr_2O_3 в энстатите увеличивается с 0.58 до 1.44 мас. %, что приводит к уменьшению количества Al_2O_3 и снижению содержания Cr_2O_3 во флогопите (сосуществующем с энстатитом) с 2.1 до 1.2 мас.%. Флогопит доминирует в системе при $X_{\text{KCl}} = 0.4$, энстатит и гранат отсутствуют.

Кианит, обнаруженный в системах пироп – энстатит + H_2O – KCl и кноррингит – пироп – энстатит + H_2O – KCl, образуется в ходе разложения пироба по реакции:



Присутствие SiO_2 во флюиде объясняется либо изначально небольшим избытком этого компонента в исходных смесях, либо повышенной растворимостью SiO_2 во флюиде в равновесии с $\text{Phl} + \text{En}$ [7]. Отсутствие среди экспериментальных продуктов форстерита, типичного продукта инконгруэнтного растворения флогопита в водном флюиде, является косвенным признаком повышенной активности SiO_2 во флюиде.

Увеличение X_{KCl} во флюиде сопровождается последовательным разложением богатых алюминием фаз, таких как гранат и энстатит. Полученные отношения указывают на последовательную реализацию следующих реакций:



Реакция 7 демонстрирует уменьшение количества алюминия в энстатите с увеличением X_{KCl} во флюиде (рис. 1, а).

Количество флогопита в системах растёт с увеличением солевого компонента во флюиде, как и содержание Cl в самом минерале, что достигает в некоторых случаях отметок в 4.03 мас. % (в системе пироп – энстатит + H_2O – KCl при 900°C) при $X_{\text{KCl}} = 0.4$ (рис. 1, б). Столь высокие содержания хлора могут обуславливаться тем, что при $X_{\text{KCl}} = 0.4$ система содержит не водно-солевой флюид, а расплав KCl с растворённой в нём водой.

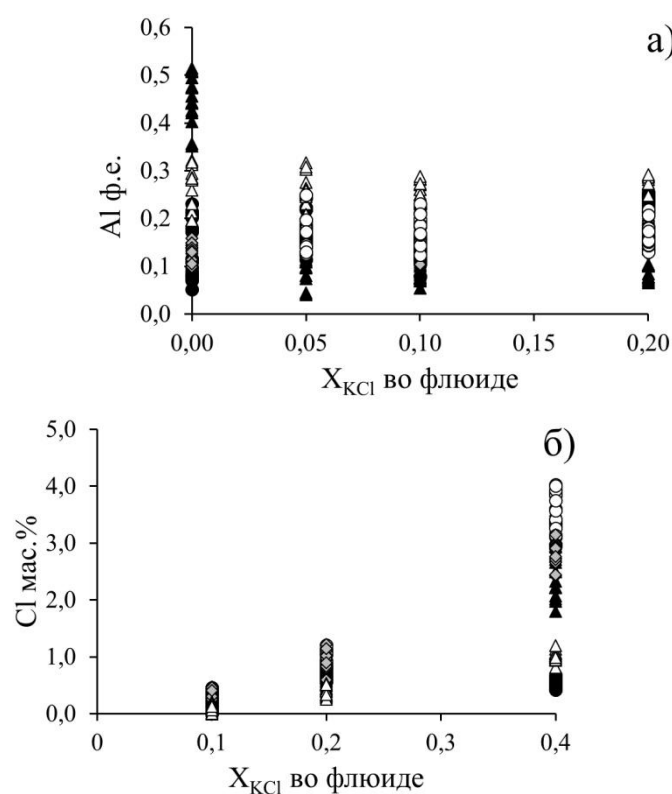


Рис. 1. а) зависимость содержания Al (ф.е.) в ортопироксене от содержания KCl во флюиде; б) зависимость содержания Cl (мас.%) во флогопите от содержания KCl во флюиде.

Условные обозначения: чёрные круги – РЕН при 1000°C, белые круги – РЕН при 900°C, чёрные треугольники – ГРЕН при 1000°C, белые треугольники – ГРЕН при 900°C и 3 ГПа, серые ромбы – КРЕН при 1000.

Из результатов эксперимента видно, что богатые алюминием энстатит и гранат становятся нестабильными в присутствии щелочного флюида $\text{H}_2\text{O} - \text{KCl}$. Формирование флогопита в эксперименте воспроизводит процесс трансформации мантийных пород во флогопит-содержащие комплексы. Изменения количества алюминия в энстатите и хлора во флогопите являются хорошими показателями активности KCl во флюиде. Данные эффекты могут быть использованы для количественной оценки активности, а также концентрации KCl во флюиде в ходе модального мантийного метасоматоза.

Работа выполнена при поддержке НИР АААА-А18-118020590148-3.

Литература:

1. Сафонов О.Г., Бутвина В.Г. Взаимодействие модельного перидотита с флюидом $\text{H}_2\text{O}-\text{KCl}$: эксперимент при давлении 1.9 ГПа и его приложение к процессам верхнемантийного метасоматоза. // Петрология, Т.21, №6, 2013, стр. 654–672.
2. Сафонов О.Г., Бутвина В.Г. Реакции – индикаторы активности K и Na в верхней мантии: природные и экспериментальные данные, термодинамическое моделирование. // Геохимия, №10, 2016, стр. 893–908.
3. Aoki K. Phlogopites and potassic richterites from mica nodules in south African kimberlites. // Contributions to Mineralogy and Petrology, vol. 48, no. 1, 1974, pp. 1-7.
4. Condamine P., Médard E. Experimental melting of phlogopite-bearing mantle at 1 GPa: Implications for potassic magmatism. // Earth and Planetary Science Letters, vol. 397, 2013, pp. 80–92.
5. Edgar A. D., Vukadinovic D. Implications of experimental petrology to the evolution of ultrapotassic rocks. // Lithos, vol. 28, issues 3-6, 1992, pp. 205–220.
6. Kamenetsky V.S., Grutter H., Kamenetsky M.B., Goman K. Parental carbonatitic melt of the Koala kimberlite (Canada): Constraints from melt inclusions in olivine and Cr-spinel, and groundmass carbonate. // Chemical Geology, vol. 353, 2013, pp. 96–111.

7. Schneider M. E., Eggler D. H. Fluids in equilibrium with peridotite minerals: implications for mantle metasomatism. // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 50, №5, 1986, pp. 711-724.
8. van Achterbergh E., Griffin W.L., Stiefenhofer, J. Metasomatism in mantle xenoliths from the Letlhakane kimberlites: estimation of element fluxes. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 141, 2001, pp. 397-414.