

**Плавление флюидсодержащего перидотита: минералого-текстурные особенности при докритических и надкритических  $P$ - $T$  условиях**

Н. С. Горбачев, А. В. Костюк, А. Н. Некрасов

*Институт экспериментальной минералогии РАН (ИЭМ РАН)*

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

Процессы мантийного магмообразования протекают при участии флюидов, которые стимулируют плавление, оказывают эффективное влияние на фазовые соотношения мантии, состав генерируемых расплавов. Одной из особенностей флюидсодержащих силикатных систем является существование критических соотношений, обусловленных высокой взаимной растворимостью флюида в силикатном расплаве и силикатов – во флюиде с увеличением  $P$  и  $T$ . Надкритические флюиды характеризуются аномальными свойствами – гиперсжимаемостью, гипертепловым расширением, гиперподвижностью, обладают эффектом термостатирования. В зависимости от  $P$ - $T$ - $X$  условий продукты экспериментов (закалочные образцы) обладают характерными особенностями текстуры, морфологии и состава. В «сухих» условиях и в присутствии летучих при докритических  $P$  и  $T$  закалочные образцы характеризуются массивной текстурой, обусловленной тем, что силикатное стекло - закалочный силикатный расплав, цементирует силикатные и оксидные (ликвидусные) минералы. Образование в некоторых условиях в стеклах закалочных фаз, несмесимых расплавов (сульфидных, карбонатных, хлоридных) не изменяют массивную структуру образца. Состав стекла отвечает составу силикатного расплава, образующегося при частичном плавлении перидотита, а минералов – составу ликвидусных фаз. При надкритических  $P$ - $T$  параметрах закалочные образцы состоят из не связанной смеси микролитов силикатных минералов и их сростков игольчатой, дендритовой формы, с глобулями силикатного стекла, сульфидов. Обращает внимание многофазный неравновесный минеральный состав образцов. Дезинтеграция образцов, отсутствие признаков частичного плавления, полиминеральный неравновесный фазовый состав обусловлены особенностями надкритической фазы – отсутствием фазовых границ между расплавом и флюидом, микрогетерогенным ее составом, включающим кластеры, характерные и для расплавов и для флюида, наследуемый закалочными фазами. С пониженной вязкостью надкритической фазы связаны формы выделения закалочных фаз. Продукты взаимодействия надкритических флюидорасплавов с перидотитом характеризуются «галечной» текстурой, крупные (до 1 мм) не связанными, окатанными выделениями, сложенных реликтами ликвидусных фаз, и продуктов их взаимодействия с надкритическими флюидорасплавами, что свидетельствует об их высокой реакционной способности.

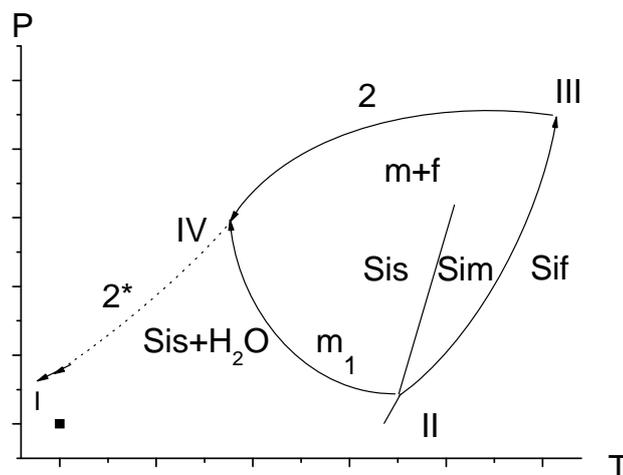
*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эксперимент; мантия; критические температура и давление; структура образцов; фазовый состав.*

**Ссылка:** Горбачев Н. С., А. В. Костюк, А. Н. Некрасов (2010), Плавление флюидсодержащего перидотита: минералого-текстурные особенности при докритических и надкритических  $P$ - $T$  условиях, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6010, doi:10.2205/2010NZ000028, 2010

**Введение**

С плавлением верхней мантии связано формирование основных, ультраосновных, кимберлитовых и карбонатитовых магм. Процессы мантийного магмообразования протекают при участии флюидов, которые стимулируют плавление, оказывают эффективное влияние на фазовые соотношения мантии, состав генерируемых расплавов. Одной из особенностей флюидсодержащих силикатных систем является существование критических соотношений, обусловленных высокой взаимной растворимостью флюида в силикатном расплаве и силикатов – во флюиде с увеличением  $P$  и  $T$ . При достижении критических  $P$  и  $T$  свойства и составы

расплава и флюида одинаковы. При  $P$  и  $T$  выше критической точки наблюдается полная смешимость между расплавом и флюидом (Рис. 1).



**Рис. 1.** Схематическая  $P$ - $T$  диаграмма фазовых соотношений в системе силикат  $Si-H_2O$ . 1-водонасыщенный солидус силиката, 2-критическая линия –  $P$ - $T$ - $X$  тренд критических точек от критической точки чистого силиката III до второй конечной критической точки IV (second critical end point) на пересечении водонасыщенного солидуса силиката стабильной частью критической линии. 2\*-метастабильная часть критической линии, заканчивающейся в критической точке воды I. Обозначения:  $s$ -твердое,  $m$ -расплав,  $f$ -флюид.

Состав и свойства надкритического флюидорасплава зависят от соотношения силикатной и флюидной компонент (линия 2 на Рис. 1). При промежуточных составах в надкритических флюидорасплавах существуют кластеры, свойственные как расплаву, так и флюиду. Двойственная природа надкритических флюидорасплавов проявляется в фазовом составе материала, образующего при их закалке [Горбачев, 2000]. При  $P$ - $T$  выше конечной критической точки не существует солидуса силиката.

### Термодинамика и свойства критических флюидорасплавов

О термодинамике и свойствах критической фазы можно судить исходя из анализа  $P$ - $V$ - $T$  свойств простых веществ, таких как вода, сера, для которых характерны критические соотношения между жидкостью и газом. На Рис. 1 приведена схематическая фазовая диаграмма давление-плотность  $P$ - $\rho$  системы с критическими явлениями (Рис. 2). В критической точке  $K$  различия между равновесными состояниями жидкой и газообразной фаз стираются, но происходят внутренние изменения, которые классифицируются как фазовый переход второго рода. При этом среда представляет собой флюид с необычными свойствами [Анисимов, 1987, Полежаев и др., 2002].

На математическом языке критическая точка  $K$  определяется как точка перегиба кривой, при приближении к критической точке первая и вторая производные стремятся к нулю. Из анализа уравнения состояний вытекают характеристики критической фазы:

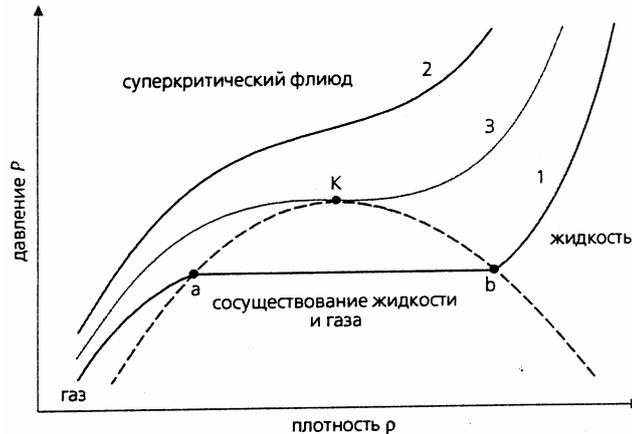
**Гиперсжимаемость.** При приближении к  $K$  первая и вторая производные стремятся к нулю  $\delta P/\delta \rho \rightarrow 0$ ,  $\delta^2 P/\delta \rho^2 \rightarrow 0$ , и соответственно обратные производные – к бесконечности. Следовательно, приращение давления вызывает большие изменения плотности  $\rho$ , что следует из условия  $\delta \rho/\delta P \rightarrow \infty$ , превращаясь в гиперсжимаемость.

**Гипертепловое расширение.** Появляется также гиперчувствительность к температурному фактору, так как выполняется другое предельное условие:

$-\delta \rho/\delta T \rightarrow \infty$ . Отсюда следует, что к бесконечности стремится коэффициент теплового расширения  $\chi$ .

**Эффект термостатирования.** Выделяются также явления, которые обнаруживаются при перемещении массы и переносе тепла. Скорость выравнивания температуры характеризуется

коэффициентом тепловой диффузии  $D$ . В окрестности  $K$   $D$  близка к нулю, т.е. релаксация неоднородности температуры происходит крайне медленно.



**Рис. 2.** Схематическая  $P$ - $\rho$  фазовая диаграмма с критическими явлениями. Изотермы: 1 – докритическая, наблюдается превращение газа в жидкость (участок  $a$  -  $b$ ), фазовый переход первого рода; 2 – газ сильно нагрет, жидкость не образуется, изотерма проходит в поле суперкритического флюида; 3 – изотерма проходит через купол двух-фазной области жидкость-газ, касаясь ее только в критической точке  $K$ . Жидкость и газ становятся тождественными, но происходят структурные изменения классифицируются как фазовый переход второго рода.  $T_2 > T_3 > T_1$ .

*Гиперподвижность.* Околокритические жидкости характеризуются высокой подвижностью, способностью к интенсивной конвекции при незначительной неоднородности теплового поля, так как число Рэлея,  $Ra = \theta \chi g l^3 / (D\nu)$ , определяющее интенсивность конвекции, стремится к бесконечности. В формуле  $Ra = \theta \chi g l^3 / (D\nu)$   $D$  и  $\chi$  – коэффициенты тепловой диффузии и теплового расширения вблизи  $K$  сильно изменяются,  $D \rightarrow 0$ ,  $\chi \rightarrow \infty$ , отсюда  $Ra \rightarrow \infty$ . Это значит, что при околокритических параметрах происходит сильная интенсификация течения и конвекции. Упомянутые выше особенности наблюдались в простых системах жидкость-газ.

Экспериментально критические соотношения наблюдались в водосодержащих силикатных системах различного состава (кварц, альбит, нефелин, базальт (эклогит), перидотит+базальт [Bureau et al., 1999, Горбачев, 2000].

Переход системы в надкритическое состояние и оценка критических  $P$ - $T$  параметров фиксировалось различными методами: визуально по гомогенизации 2-х фазной системы расплав-флюид на аппаратуре с алмазными наковальнями [Shen et al. 1997; Bureau et al., 1999], по составам закалочного водосодержащего стекла и флюида с использованием алмазных ловушек [Kessel et al., 2005], по особенностям фазового состава и строения (структуры) экспериментальных образцов [Горбачев, 2000].

### Экспериментальное изучение системы перидотит-базальт-летучий ( $H_2O$ , $H_2O+CO_2$ ) при докритических и надкритических $P$ и $T$

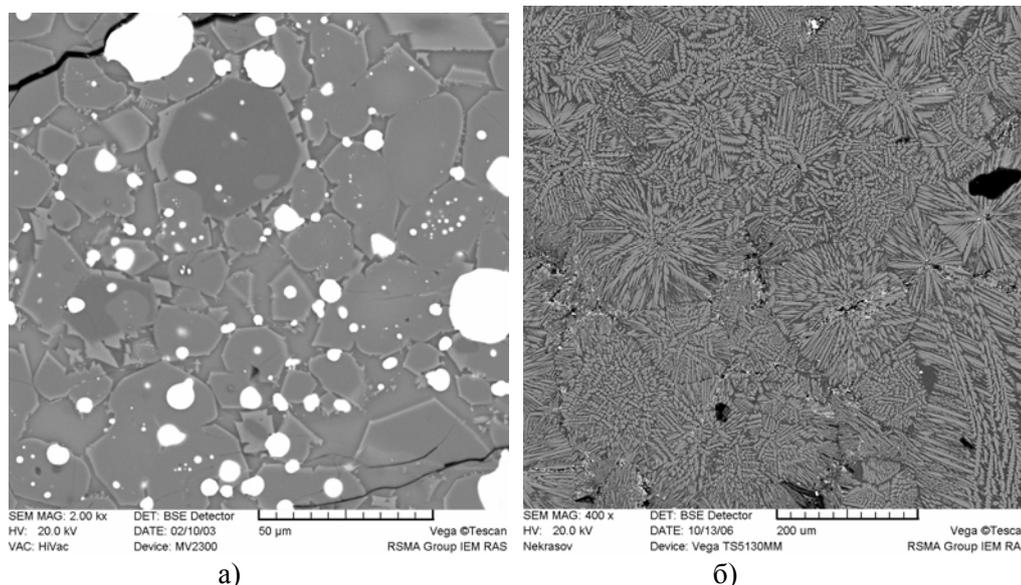
Система перидотит-базальт-летучий ( $H_2O$ ,  $H_2O+CO_2$ ) была изучена при  $T = 1250$ - $1500^\circ C$ ,  $P = 1.5$ - $4$  ГПа. Критерием перехода системы из ДК в НК состояние служили особенности текстуры и фазового состава закалочных образцов. Эксперименты проводились в ИЭМ РАН на твердофазовой аппаратуре типа цилиндр-поршень ЦП и наковальня с лункой НЛ. Использовалась методика прямого плавления исходного материала в насыщенных железом  $Pt$  ампулах и многоампульная методика с  $Pt$  и перидотитовой ампулами [Горбачев, 2000]. Тестом перехода системы в надкритическое состояние служили особенности фазовых соотношений и текстуры закалочных экспериментальных образцов.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** На Рис. 2 приведены микрофотографии, характеризующих фазовые соотношения и структуру образцов при плавлении системы

перидотит-базальт-сульфид при  $T = 1450^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 4$  ГПа с  $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  флюидами с использованием методики перидотитовой ампулы.

*Докритические условия.* Многочисленные эксперименты показали, что при прямом плавлении перидотита и эклогита как в «сухих» условиях, так и в присутствии летучих, независимо от экспериментальной методики (прямое плавление, метод перидотитовой ампулы) закалочные образцы характеризуются массивной структурой, обусловленной тем, что силикатное стекло - закалочный силикатный расплав, цементирует силикатные и оксидные (ликвидусные) минералы. При медленном охлаждении происходит кристаллизация силикатного расплава, давая полнокристаллические образцы. Образование в некоторых условиях закалочных фаз, расплавов (сульфидных, карбонатных), несмешиваемых с силикатным, не изменяют массивную структуру образца (Рис. 4).

В экспериментах с использованием методики перидотитовой ампулы с  $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$  во всем изученном интервале  $P$  и  $T$  флюидом при сохранении исходного строения образца: перидотитовая ампула, заполнена силикатным стеклом, продуктом закалки базальтового расплава с включениями сульфидной фазы – закалочного сульфидного расплава, темная полоса – реакционная зона базальтовый расплав-перидотит (Рис. 5а). Состав расплава – оливин-базальтовый, ликвидусной ассоциации, (на границе со стеклом) – гарцбургитовый ( $\text{Ol}+\text{OPx}$ ), Аналогичные соотношения характерны также для экспериментов с  $\text{H}_2\text{O}$  флюидом при  $P = 1.5-2.5$  ГПа,  $T = 1250-1350^{\circ}\text{C}$ . Наблюдаемые особенности фазового состава и структуры образцов свидетельствуют о том, при данных составах критические  $P$  и  $T$  не достигались.



**Рис. 4.** Микрофотография полированного шлифа во вторичных электронах: структура закалочных образцов при докритических  $P$ - $T$ . Массивная текстура, межзерновое стекло цементирует ликвидусные а) или закалочные б) фазы: а) - частичное плавление перидотита.  $T = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 2.5$  ГПа,  $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$  флюид. б) полное плавление эклогита, закалочный  $\text{Srx}$  цементируется межзерновым стеклом.  $T = 1350^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 4$  ГПа,  $\text{H}_2\text{O}$  флюид.

*Надкритические условия.* В экспериментах с  $\text{H}_2\text{O}$  флюидом при  $T = 1400^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 4$  ГПа с использованием методики перидотитовой ампулы и тех же исходных составах наблюдалась полная дезинтеграция закалочных образцов, состоящих из не связанной смеси микролитов силикатных минералов и их сростков игольчатой, дендритовой формы, с глобулями силикатного стекла, сульфидов. Обращает внимание многофазный, неравновесный минеральный состав образцов. Дезинтеграция образцов, отсутствие признаков частичного плавления – межзернового расплава, ликвидусной ассоциации свидетельствуют о критических соотношениях в системе при  $P$  и  $T$  близких к конечной критической точке (Рис. 5 б).

При частичном плавлении флюидсодержащего перидотита критические  $P$  и  $T$  могут достигаться только между расплавом, продуктом частичного плавления перидотита и флюидом. При этом наблюдается отсутствие стекла – закалочного межзернового расплава, дезинтеграция экспериментального образца, надкритический флюидорасплав взаимодействует с перидотитом. Взаимодействие надкритического базальтового флюидорасплава с перидотитом

наблюдалось в системе перидотит-базальт-сульфид-щелочно-водно-карбонатный флюид при 1400°C, 4 ГПа (Рис.6 а, б). Внутренняя часть перидотитовой ампулы заполнена продуктами закалки базальтового флюидорасплава - рыхлой несвязанной смесью микролитов полиминерального состава - силикаты, карбонаты, сульфидные и алюмо-силикатные микроглобулы (Рис. 6 а, б). Отсутствие межзернового расплава приводит к деструкции перидотитовой ампулы, состоящей из изолированных ликвидусных минералов – оливина *Ol*, орто и клинопироксенов *Orx*, *Срх*.

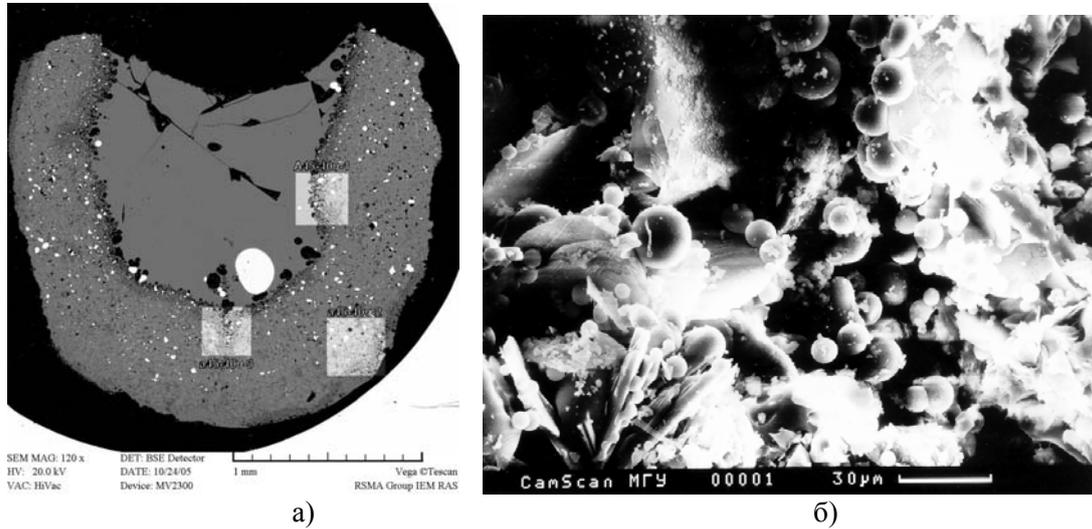
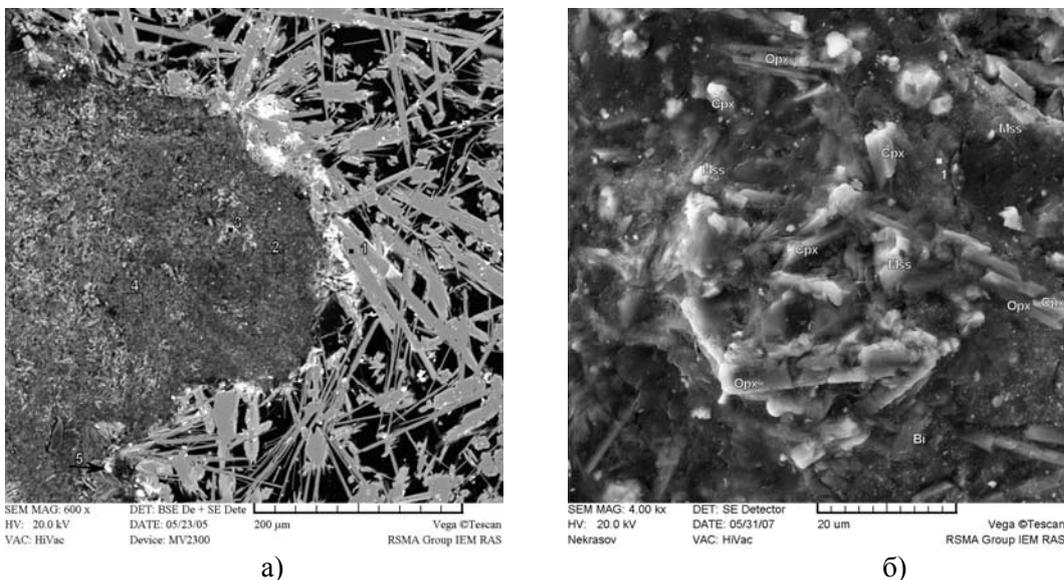
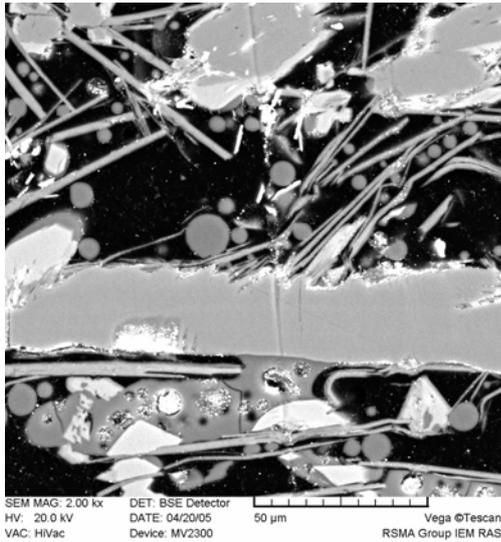


Рис. 5. Микрофотография полированных шлифов экспериментальных образцов во вторичных электронах. Система перидотит-базальт-летучий.  $T = 1400^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 4$  ГПа а) – с  $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$ , докритические условия, сохраняется исходное строение образца; б) – та же система с  $\text{H}_2\text{O}$  флюидом, надкритические условия. Наблюдается полная дезинтеграция и перидотита и базальта исходного образца после опыта, свидетельствующее о достижении конечной критической точки при  $1400^{\circ}\text{C}$ , 4 ГПа.

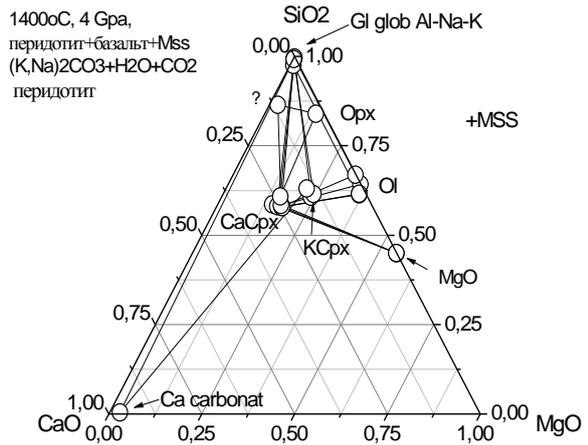
С взаимодействием надкритического флюидорасплава с минералами рестита перидотита связаны реакционные соотношения *Ol-Orx-CaCpx-KCpx*-карбонат, образование флогопита, с закалкой надкритического флюидорасплава образование *Al-Si* глобуль (рис. 6. а-г).

Взаимодействие надкритического водно-базальтового флюидо расплава с перидотитом в системе перидотит- $\text{H}_2\text{O}$  при  $P = 4$  ГПа, в интервале  $T = 1400-1450^{\circ}\text{C}$  приводит к формированию закалочных «брекчий» с характерной «галечной» структурой, состоящих из изолированных окатанных выделений *Ol*, *Orx*, *Срх* состава (реликты перидотита) с новообразованным цементом гранат-клинопироксенового (Рис. 7 в).



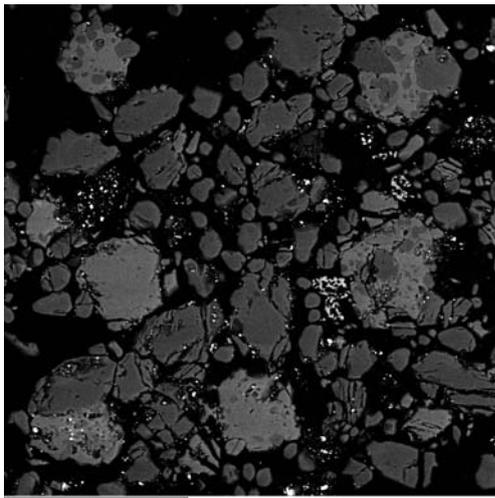


в)

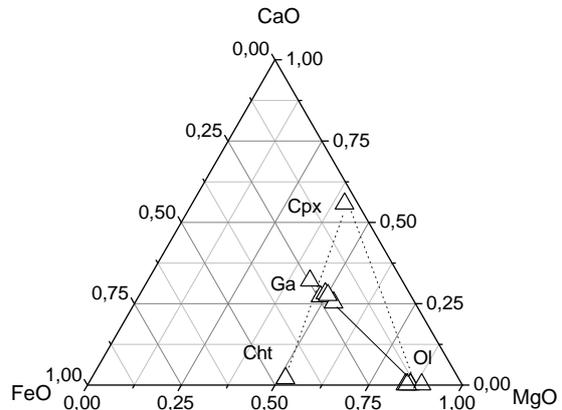


г)

**Рис. 6.** Микрофотография полированного шлифа экспериментального образца во вторичных электронах. б а-в - структура закалочного образца; б г - фазовый состав. Исходный образец - перидотитовая ампула, базальт, щелочно-водно-карбонатный флюид. T=1400°C, P=4 ГПа: а) общий вид перидотитовой ампулы, внутренняя часть ампулы сложена микролитами, продуктами закалки силикатного расплава, наружная часть, – реститами ликвидусных фаз перидотита, реакционными и закалочными минералами, межзерновое стекло отсутствует; б) – микролиты внутренней части ампулы; в) –перидотитовая часть ампулы, минералы рестита, реакционные и закалочные фазы; г) – фазовый состав.



а)



б)

**Рис. 7.** Микрофотография полированного шлифа экспериментального образца во вторичных электронах. а) - Закалочная «брекчия» с «галечной» структурой. Изолированные окатанных выделений *Ol*, *Opx*, *Cpx* состава (реликты перидотита) с новообразованным цементом гранат-клинопироксенового; б) – фазовый состав.

Деструкция мантийного субстрата при взаимодействии с надкритическими флюидорасплавами может иметь важное значение в тектонике - формировании ослабленных зон, разломов в литосфере.

Поддержка - РФФИ 09-05-01131.

**Литература**

- Анисимов М. А. (1987). *Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах*, Наука, Москва.
- Горбачев Н. С. (2000), Надкритическое состояние в водосодержащей мантии (по данным экспериментального изучения флюид содержащего перидотита при P=40 кбар, T=1400°C .. *Докл. Академии Наук РАН*, № 3, 362-365.
- Полежаев В.И., Е. Б. Соболева (2002), Гидродинамика околокритических жидкостей, *Известия РАН*, № 1, 81-93.
- Bureau H., H. Keppler (1999), Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids in the upper mantle: experimental evidence and geochemical implications, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 165, 187-196.
- Kessel R., P. Ulmer, T. Pettke, M. W. Schmidt, A. B. Thompson (2005), The water-basalt system at 4 to 6 GPa: Phase relations and second critical endpoint in a K-free eclogite at 700 to 1400°C, *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 237, 873-892.
- Shen A. H., H. Keppler (1997), Direct observation of complete miscibility in the albite-H<sub>2</sub>O system, *Nature*, 385, 710-712.

Н. С. ГОРБАЧЕВ, А. В. КОСТЮК, А. Н. НЕКРАСОВ Институт экспериментальной минералогии РАН (ИЭМ РАН), e-mail: [gor@iem.ac.ru](mailto:gor@iem.ac.ru)