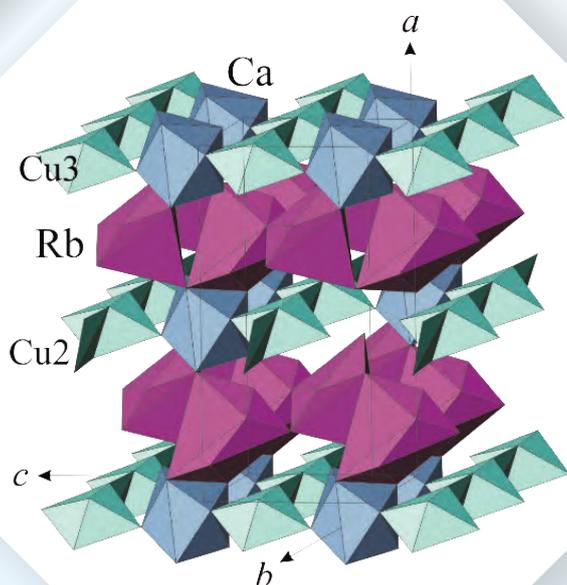


ТРУДЫ
ВСЕРОССИЙСКОГО
ЕЖЕГОДНОГО СЕМИНАРА
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
МИНЕРАЛОГИИ,
ПЕТРОЛОГИИ
И ГЕОХИМИИ
(ВЕСЭМПГ-2018)



**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Отделение наук о Земле**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
(ГЕОХИ РАН)**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт экспериментальной минералогии
(ИЭМ РАН)**

Российское минералогическое общество

**ТРУДЫ
ВСЕРОССИЙСКОГО
ЕЖЕГОДНОГО СЕМИНАРА
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
МИНЕРАЛОГИИ, ПЕТРОЛОГИИ
И ГЕОХИМИИ
(ВЕСЭМПГ-2018)**

Москва, 18–19 апреля 2018 г.



Москва

**RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
Branch of Earth Sciences**

**Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry
of the Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS)**

Institute of Experimental Mineralogy (IEM RAS)

Russian mineralogical society

**PROCEEDINGS
OF RUSSIAN ANNUAL SEMINAR
ON EXPERIMENTAL MINERALOGY,
PETROLOGY AND GEOCHEMISTRY
(RASEMPG - 2018)**

Moscow, 18–19 April 2018



УДК 550.4:550.4.02:550.426:550.3:552.6:523.3:502.1
ББК 26.30 26.31
Т782

Ответственный редактор
проф. дгмн О.А. Луканин

**Заместитель
ответственного редактора**
проф. дгмн О.Г. Сафонов

Ответственный секретарь
Е.Л. Тихомирова

Редакционная коллегия

академик Л.Н. Когарко
чл.-корр. дхн О.Л. Кусков
чл.-корр. дгмн Ю.Б. Шаповалов
проф., дгмн А.А. Арискин
дгмн А.Р. Котельников

проф. дхн Ю.А. Литвин
дхн Е.Г. Осадчий
дгмн Ю.Н. Пальянов
дхн Б.Н. Рыженко
кгмн О.И. Яковлев

Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Москва, 18–19 апреля 2018 года. / Отв. редактор О.А. Луканин, - М: ГЕОХИ РАН, 2018, 472 с. ISBN 978-5-905049-22-4.

Представлены краткие статьи по материалам докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2018 года с описанием результатов оригинальных научных исследований, новых методов и идей, ориентированных на практическое решение широкого спектра проблем современной экспериментальной геохимии.

Editor-in-Chief

prof. Dr of Geol.-Min. Sci. O.A. Lukanin

**Deputy
Editor-in-Chief**

Prof. Dr of Geol.-Min. Sci. O.G. Safonov

**Executive
Secretary**

E.L. Tikhomirova

Editorial Board

Academician, Dr of Geol.-Min.Sci. L.N. Kogarko
Corr.memb, Dr of Chem.Sci. O.L. Kuskov
Corr.memb, Dr of Geol.-Min.Sci. Yu.B. Shapovalov
Prof., Dr of Geol.-Min.Sci. A.A. Ariskin
Prof., Dr of Geol.-Min.Sci. A.R. Kotel'nikov

Prof., Dr of Chem.Sci. Yu.A. Litvin
Dr of Chem.Sci. Eu.G. Osadchii
Dr of Geol.-Min.Sci. Yu.N. Pal'yanov
Dr of Chem.Sci. B.N. Ryzhenko
Cand.of Geol.-Min.Sci. O.I. Yakovlev

Proceedings of Russian Annual Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Moscow, 2018 April 18–19. / Ed. O.A. Lukanin, M.: GEOKHI RAS, 2018, 472 p. ISBN 978-5-905049-22-4.

The results of original research, new methods and idea focused on practiciable decides of wide specra of problems of modern experimental geochemistry are presented in short papers on materials of Russian Annual Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology, and Geochemistry 2018.

ISBN 978-5-905049-22-4

© Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), 2018

УДК 550.4.02

ПЛАВЛЕНИЕ H₂O-СОДЕРЖАЩЕГО ПЕРИДОТИТА И ЭКЛОГИТА ПРИ T=1000-1400°C, P=4 ГПА: ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И КРИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

Горбачев Н.С., Костюк А.В., Султанов Д.М., Некрасов А.Н.

Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Московская область (gor@iem.ac.ru)

MELTING OF H₂O-CONTAINING PERIDOTITE AND ECLOGITE AT T=1000-1400°C, P=4 GPa: PHASE COMPOSITION AND CRITICAL RELATIONS

Gorbachev N.S., Kostyuk A.V., Soultanov D.M., Nekrasov A.N.

Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, Moscow district. (gor@iem.ac.ru)

Abstract. Phase relationships in peridotite-H₂O and eclogite-H₂O systems were studied at T=1000-1400°C, P=4 GPa. In the peridotite system quenching samples were characterized by anomalous structure and phase composition. The quenching material is represented by compacted microgranular powder consisting of isolated relicts of liquidus minerals of peridotite Ol, Opx, Cpx composition. The individual fragments were characterized by a "brecciated" texture formed by inclusions of Ol relicts in the Grt-Cpx matrix. Silicate glass was found in the form of isolated microglobules. In the eclogite system quenching samples were characterized by a massive structure, due to the fact that the silicate glass-quenching silicate melt, localized in the intervals between the liquidus phases of the Cpx-Grt composition, cemented the sample. The anomalous structure and phase composition of quenching samples of the *peridotite system* indicate the existence of critical relationships between the silicate melt and fluid. The structure and phase composition of quenching samples of the *eclogite system* indicate the absence of critical relationships between the silicate melt and fluid.

Keywords: peridotite, eclogite, fluid, critical relations, experiment

Введение. Существование критических соотношений при высоких давлениях и температурах - особенность флюид-содержащих силикатных систем. При критических $P_k T_k$ наблюдается полная смесимость между расплавом и флюидом с образованием надкритического флюидорасплава, а во второй конечной критической точке ($2P_k T_k$) при равенстве P-T солидуса силиката и $P_k T_k$ 2-х фазного равновесия расплав-флюид – полная смесимость между ликвидусными фазами, расплавом и флюидом. По экспериментальным данным критические $P_k T_k$ и $2P_k T_k$ в H₂O-содержащих силикатных системах мономинерального (SiO₂, альбит, нефелин, жадеит) и гранитного составов лежат в интервале P=0.7–2.3 ГПа, T=550-1050°C, возрастая в последовательности Q, Ne, Ab, Jd, гранит (Bureau, Keppeler, 1999). В системах основного и ультраосновного состава $P_k T_k$ и $2P_k T_k$ имеют более высокие значения. Так, в системе Fo-En-H₂O давление во второй конечной критической точке оценивается в 12-13 ГПа (Stalder et al. 2001), базальт (эклогит)+H₂O – 5-6 ГПа (Kessel et al., 2005), базальт (эклогит)+перидотит+H₂O – 3.8-4.0 ГПа (Горбачев, 2000), перидотит+H₂O – 3.8-4 ГПа (Mibe et al., 2007, Горбачев и др., 2015). Учитывая большой температурный интервал между солидусом и ликвидусом в системах основного и ультраосновного состава, а также формирование мантийных магм при частичном плавлении вещества мантии, большой интерес представляют исследования критических соотношений между парциальными (подликвидусными) расплавами и флюидом в присутствии рестита – минералов тугоплавкого остатка. В этом отношении силикатные системы слабо изучены. Для оценки начальных критических P-T и выяснения особенностей взаимодействия надкритических флюидорасплавов с силикатами изучено частичное плавление H₂O-содержащих перидотита и эклогита при P=4 ГПа, T=1000-1400°C, близких к мантийной адиабате.

Методика. Эксперименты проводились в ИЭМ РАН на установке НЛ-10 с использованием многоампульной закалочной методики. В интервале T=1000-1200°C применялись Au ампулы, при T=1300 Au-Pd ампулы, при T=1400°C ожелезненные Pt ампулы. Исходными веществами служили Grt перидотит из ксенолита кимберлитовой трубки Обнаженная, Якутия, из коллекции А. Уханова, толеитовый базальт СТ-1, химический аналог Сибирского траппа и дистиллированная H₂O. Весовое соотношение силикат-H₂O варьировало от 6 до 2. Температура измерялась Pt30Rh/Pt6Rh термопарой, давление при высоких температурах калибровалось по кривой равновесия кварц - коэзит. Точность определения температуры и давления в опытах оценивается в $\pm 5^\circ\text{C}$ и ± 1 кбар (Литвин, 1991). Длительность эксперимента составляла от 8 до 24 час. Полированные препараты закалочных образцов изучались и анализировались в ИЭМ РАН на ЭСМ CamScan MV2300.

Результаты. Представительные составы сосуществующих фаз приведены в таблице 1.

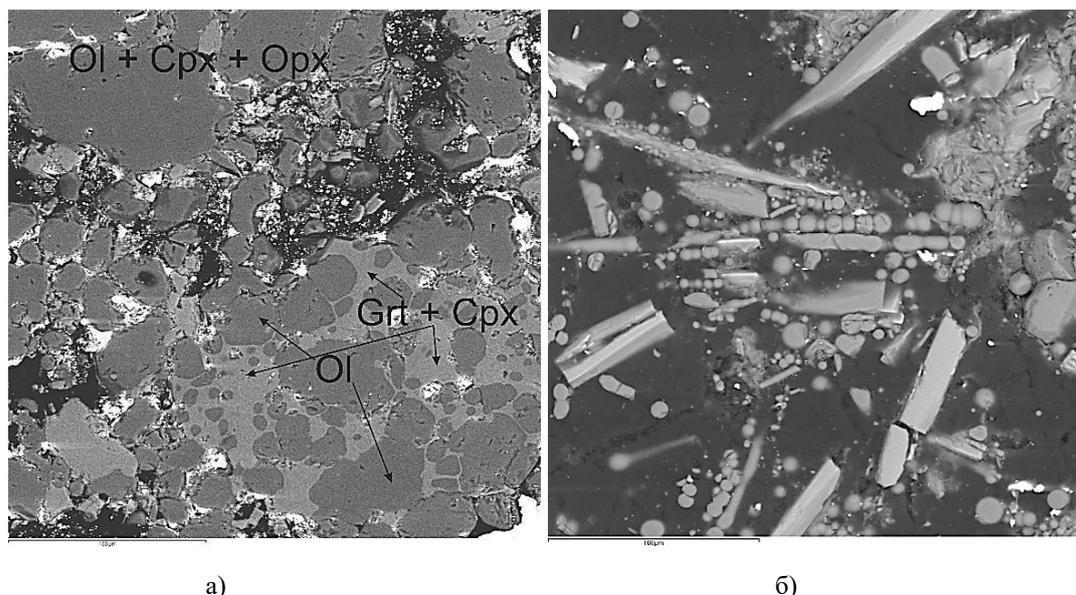
В системе перидотит- H_2O при $T=1000-1300^\circ C$ закалочные образцы характеризовались аномальным строением и фазовым составом (табл. 1, рис. 1). Главной их особенностью является отсутствие межзернового закалочного силикатного стекла - закаленного силикатного расплава, характерного признака частичного плавления. Стекло цементирует закалочные образцы, придавая им монолитную текстуру. Его отсутствие приводило к их дезинтеграции, закалочный материал представлен спрессованным микрозернистым порошком, состоящим из изолированных выделений или сростков ликвидусных минералов дезинтегрированного перидотита – оливина Ol, ортопироксена Орх, клинопироксена Срх. При $T=1000-1100^\circ C$ близких к температуре солидуса H_2O -содержащего перидотита отдельные фрагменты закалочного образца характеризовались «брекчиевидной» текстурой (рис. 1а). В таких фрагментах («брекчиях») наблюдалось замещение перидотитовой ассоциации Ol+Орх новообразованной эклогитовой ассоциацией Grt-Срх состава. В «брекчиях» включения реликтов Ol+Орх локализованы в матрице Grt+Срх состава. Ol из «брекчий» и основной массы сходны по составу. При более высоких $T=1200-1300^\circ C$ и степенях плавления фрагменты с «брекчиевидной» текстурой не встречались, хотя и наблюдались реакционные соотношения между Ol и Срх. При этих параметрах силикатное стекло встречалось в виде изолированных микроглобуль Al-Si-Ca состава (рис. 1б).

Таблица 1. Система перидотит- H_2O . Представительные составы сосуществующих фаз.

T = 1000°C											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Сумма
Ol	40.51	0.0	0.32	7.89	0.21	50.95	0.11	0.16	0.00	0.0	100.17
Gr	40.95	0.21	19.19	8.31	0.38	17.66	8.80	0.21	0.08	4.15	99.95
Срх	52.04	0.18	3.19	1.71	0.17	16.45	21.51	1.28	0.04	0.56	97.11
Орх	54.64	0.0	3.70	5.23	0.29	34.52	0.83	0.23	0.00	0.32	99.76
Chr	0.46	0.25	18.63	16.62	0.0	13.45	0.43	0.23	0.07	44.81	94.95
T = 1100°C											
Ol	41.11	0.02	0.09	8.22	0.06	49.78	0.03	0.04	0.03	0.20	99.59
Gr	41.83	0.03	22.17	5.58	0.45	19.94	7.99	0.17	0.00	2.37	100.54
Срх	52.77	0.15	2.57	2.55	0.17	18.56	21.52	0.05	0.05	0.70	99.10
Chr	0.71	0.17	37.38	10.41	0.56	19.37	0.13	0.12	0.03	34.40	103.28
T = 1200°C											
Ol	40.79	0.05	0.12	4.97	0.12	52.47	0.13	0.04	0.05	0.20	99.05
Срх	50.06	0.18	5.33	5.56	0.26	16.05	18.28	0.01	0.00	0.52	96.31
К-Срх	49.62	2.71	13.86	9.80	0.25	4.50	13.77	1.24	1.36	0.00	97.61
Chr	0.08	0.00	4.23	9.57	0.44	15.43	0.16	0.27	0.00	68.10	98.37
Gl	73.65	0.19	6.89	0.41	0.25	4.03	2.09	0.05	0.47	0.03	88.16
T = 1300°C											
Ol	41.52	0.14	0.09	5.66	0.04	54.90	0.08	0.00	0.00	0.01	102.67
Срх	53.18	0.08	3.49	4.17	0.62	20.08	19.63	0.00	0.00	0.87	102.12
Орх	54.35	0.17	5.96	8.54	0.27	31.29	2.31	0.07	0.03	0.00	102.99
T = 1400°C											
Ol	41.30	0.12	0.17	0.24	0.0	57.33	0.01	0.12	0.08	0.71	100.10
Срх	48.30	0.62	15.90	0.72	0.43	11.17	23.79	0.27	0.0	0.28	101.52
Gl	49.78	0.44	15.84	0.17	0.05	0.02	8.56	0.28	0.41	0.08	81.82

При $T=1400^\circ C$ образцы характеризовались массивной текстурой. Появлялось межзерновое стекло. Закалочные образцы состояли из Ol, с нехарактерной для него удлиненной, до 400 мкм, формой, сцементированного силикатным стеклом с включениями Срх (рис. 2а). На полированной поверхности закалочных образцов ориентированные дендритовидной формы выделения Ol образуют рисунок треугольной или ромбовидной формы.

В системе эклогит- H_2O в интервале $T=1200-1400^\circ C$ закалочные образцы характеризовались массивной текстурой с характерными признаками частичного плавления – матрица представлена силикатным стеклом трахи-андезитового состава с включениями клинопироксена и слюды (возможно закалочной) (рис. 2б). Представительные составы сосуществующих фаз приведены в табл. 2.



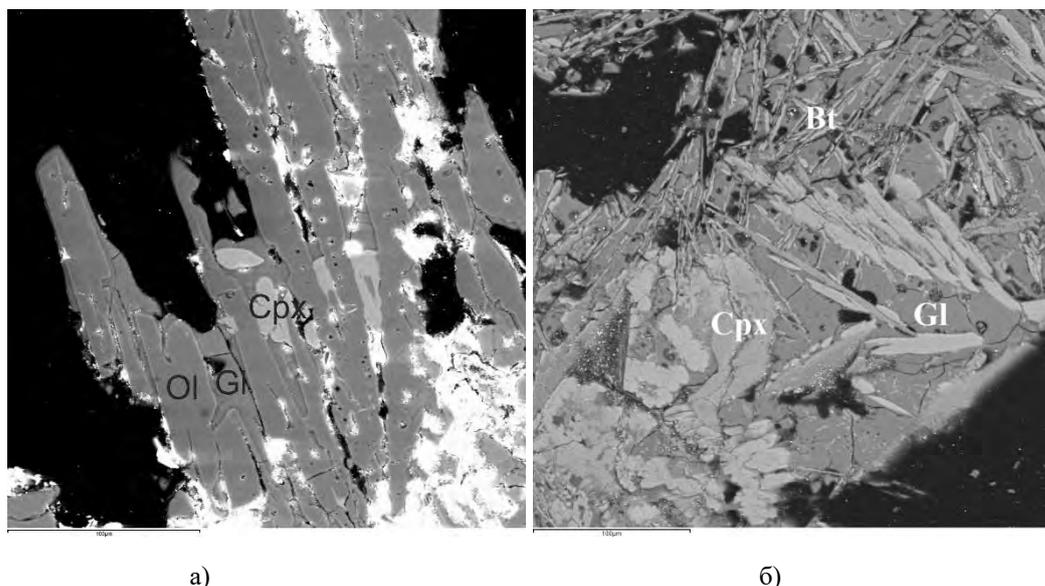
а)

б)

Рис. 1. SEM микрофотографии закалочных образцов: а) $T=1100^{\circ}\text{C}$, реакционная «брекчия», б) $T=1300^{\circ}\text{C}$, дезинтегрированный перидотит, состоящий из реликтов Ol и Crx и микроглобулей Al-Si стекла, продукта закалки надкритического флюидорасплава.

Таблица 2. Система эклогит- H_2O . Представительные составы сосуществующих фаз.

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	Сумма
Crx	46.40	2.75	12.61	6.26	0.31	8.89	20.45	1.56	0.01	0.19	99.43
Bt	41.21	2.45	11.77	8.13	0.11	16.13	1.67	1.20	6.57	0.15	89.38
Gl	63.06	0.14	18.84	0.48	0.03	0.02	2.87	5.82	3.83	0.00	95.08



а)

б)

Рис. 2. SEM микрофотографии закалочных образцов: а) система перидотит- H_2O , $T=1400^{\circ}\text{C}$; б) система эклогит- H_2O , $T=1300^{\circ}\text{C}$.

Обсуждение. В большинстве экспериментальных работах использовались «дистанционные» методы исследования, без анализа вещества, в которых переход из докритического в надкритическое состояние фиксировался или оптически в «гидротермальных алмазных наковальнях» (Shen, Keppler, 1997), или с помощью высокотемпературной рентген-радиографии (Mibe et al., 2007). Использование этих методов не позволяет изучать вещество. Кроме того, возможности первого метода ограничены модельными силикатными системами с низкими T солидуса, такими как Ab, Ne, Jd, дацит, гаплогранит (Bureau, Keppler, 1999). Исключение составляют работы по изучению критических соотношений в системе $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2\text{-MgO-H}_2\text{O}$, эклогит- H_2O , перидотит-базальт- H_2O с использованием закалочного метода, в которых тестом перехода системы силикат- H_2O от докритических давлений к надкритическим служили текстуры

закалочных образцов, отсутствие закалочного стекла, состав закалочных фаз (Kennedy et al., 1962, Stalder et al., 2001, Kessel et al., 2005, Горбачев, 2000).

Аномальную текстуру и фазовый состав закалочных образцов в системе перидотит- H_2O в интервале $T=1000-1300^\circ C$ можно объяснить существованием критических соотношений между парциальным силикатным расплавом и флюидом. Текстуры и фазовый состав закалочных образцов изменяется с увеличением температуры.

Массивная текстура закалочных образцов при частичном плавлении перидотита и эклогита ($T=1400-1300^\circ C$), наличие в них закалочного межзернового стекла, цементирующего ликвидусные минералы, свидетельствуют о том, что при этих условиях происходило частичное плавление в докритических условиях, при закалке парциальных расплавов образуется силикатное стекло, которое «цементирует» минералы рестита, придавая закалочным образцам высокую добротность.

Обнаруженная экспериментально эклогитизация перидотита при взаимодействии с надкритическими флюидорасплавами с замещением перидотитовой ассоциации $O1+Orx$ эклогитовой $Grt+Sprx$ может служить эффективным механизмом преодоления «эклогитового» барьера, объясняющая эклогитовый «парадокс» - совместное существование перидотитового и эклогитового парагенезисов во включениях в алмазах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-05-00930а.

Литература

- Горбачев Н.С. Надкритическое состояние в водосодержащей мантии (по данным экспериментального изучения флюид содержащего перидотита при $P=40$ кбар, $T=1400^\circ C$) // ДАН. 2000. 371.3. С. 362-365.
- Горбачев Н.С., Костюк А.В., Шаповалов Ю.Б.. Экспериментальное изучение системы перидотит- H_2O при $P=3.8-4$ ГПа, $T=1000-1400^\circ C$: Критические соотношения и вертикальная зональность верхней мантии // ДАН, 2015, том 461, № 4, с. 442-446
DOI: 10.7868/S0869565215100175
- Литвин Ю.А. Физико-химические исследования плавления глубинного вещества Земли. М. Изд. Наука. 1991.
- Bureau H., H. Keppler. Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids in the upper mantle: experimental evidence and geochemical implications // Earth Planet Sci. Lett. 1999. 165. p.187-196.
- Kennedy G.C., Wasserburg G.J., Heard H.C., Newton R.C. The upper three-phase region in the system SiO_2-H_2O // Am J Sci. 1962. 260(7):501-521.
- Kessel R., P. Ulmer, T. Pettke, M.W. Schmidt, A.B. Thompson. 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 Science Letters, 2005. V. 237. P. 873-892.
- Mibe K., Kanzaki M., Kawamoto T., Matsukage K. N., Fei Y. and Ono S. Second critical endpoint in the peridotite- H_2O system // J. Geophys. Res. 2007. 112, B03201.
- Shen A.H., Keppler H. Direct observation of complete miscibility in the albite- H_2O system // Nature. 1997. 386(6618):710-712.
- Stalder R., Ulmer P., Thompson A.B., Gunther D. High pressure fluids in the system $MgO-SiO_2-H_2O$ under upper mantle conditions // Contrib. Mineral. Petrol. 2001. V.140. P. 607-618.