Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

Научно-квалификационная работа

Влияние водорода и углерода на дифференциацию мантийных магм при высоких давлениях в восстановительных условиях (экспериментальное исследование)

Специальность:

25.00.09 - Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Работу выполнила:
Русак Александра Андреевна
Научный руководитель:
д.г.-м.н., г.н.с. Луканин Олег Александрович

Москва - 2022

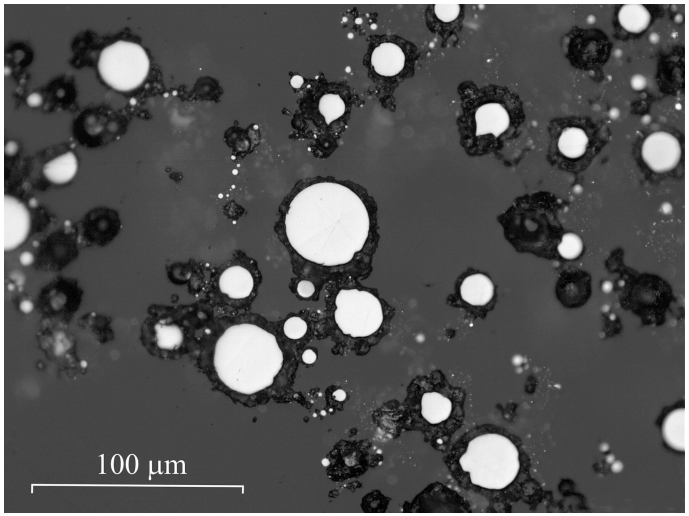
Введение

- Дегазация летучих компонентов, растворенных в магматических расплавах при их подъеме и кристаллизации, является одним из главных факторов, контролирующих перенос и состав летучих компонентов из недр к поверхности Земли.
- Процессы взаимодействия основных летучих соединений системы C-O-H (водой, водородом, метаном и углеродом) с силикатными расплавами при различных окислительно-восстановительных условиях были рассмотрены во многих работах (Литвин, 1981; Eggler, Baker, 1982; Holloway, Jakobsson, 1986; Taylor, Green, 1987; Bezmen et al., 1991; Kadik et al., 2000; Kadik et al., 2004; Кадик и др., 2014; Кадик и др., 2015; Кадик и др., 2017; Sokol et al., 2019; Персиков и др., 2019; Луканин и др., 2020; Русак, Луканин, 2022).
- В 50-х годах XX века были проведены первые экспериментальные работы по изучению силикатных систем, содержащих металлическую фазу железа, в которых показана роль летучести кислорода для дифференциации базальтовых магм с образованием более кислых толеитовых и известково-щелочных серий (Osborn, 1959). Позднее проводили работы по кристаллизации магматических расплавов в широком диапазоне редокс-условий Р. Хилл и П. Роедер (1974), Р.Н.Томпсон (1975), Г. М. Биггар (1978, 1983), А.А. Кадик (1982, 1990, 2006, 2014, 2016, 2017), Т. Гров (1982, 1984), Луканин и др. (2020), Русак и др. (2022) и др.

Актуальность и новизна работы

- В настоящее время вопрос об источнике и составе летучих компонентов ранней мантии Земли и составе ранней атмосферы остается дискуссионным.
- В современных экспериментальных работах хорошо изучено влияние летучих на фазовые равновесия при кристаллизации и дифференциации магм в окислительной области при летучести кислорода «современной мантии» (fO_2 > IW), но остаются мало изученными процессы дифференциации магм в восстановительных условиях с образованием металлической фазы (fO_2 < IW-1), а также роль летучих в этих процессах. Эти данные необходимы для понимания процессов формирования мантийного и корового вещества на ранних стадиях формирования Земли и других планетных тел.

Предыдущие экспериментальные исследования



Стекло с каплями металлического железа и кристаллами графита при P = 4 ГПа, T = 1550°C, lgfO$_2$=IW-2.9, 7 мас. % SiC (Луканин и др., 2020).

- Ранее в экспериментах, проведенных при T = 1550°C и P = 4 ГПа и летучестях кислорода на 0,5 – 2,9 логарифмических единиц ниже буфера железо-вюстит (Fe-FeO) (IW) в равновесии с силикатным расплавом и микрокристаллическими фазами графита образовывались жидкие металлические глобули, преимущественно Fe-Ni состава. При данных редокс-условиях металлические капли соответствуют сегрегации металлической фазы в продуктах плавления ранней восстановленной мантии Земли и др. планетных тел (Луканин и др., 2020; Frost et al., 2008; Galimov et al, 2005 и др.).
- В полученных стеклах методом SIMS (КР спектроскопия) было определено влияние C-O-H летучих. Показано, что с уменьшением летучести кислорода содержание воды (OH + H_2O) в расплавах уменьшается, при этом возрастает содержание метана и комплексов с C-H связью (Луканин и др., 2020; Кадик и др., 2017; 2014; 2015; 2011; Kadik et al, 2004 и др.).

Цель работы

- провести анализ процессов кристаллизации и дифференциации магматических расплавов, образующихся на ранних этапах формирования Земли при глобальном плавлении планетного вещества в присутствии летучих компонентов и восстановительных условиях, когда в равновесии с силикатными расплавом и кристаллами образуется металлическая фаза железа;
- провести экспериментальное исследование при высоких параметрах T и P при летучести кислорода ниже буфера железо-вюстит.

Задачи работы

- проведение экспериментов в системе SiO_2-MgO-FeO-C-H при T = 1500 и 1600°C и P = 2,5-3,5 ГПа и с природным ферробазальтом при T = 1500°C и P = 4 ГПа;

- построение трехкомпонентной диаграммы плавкости для системы SiO_2-MgO-FeO, на которой нужно отметить область возможного выделения металлической фазы железа при восстановительных условиях;

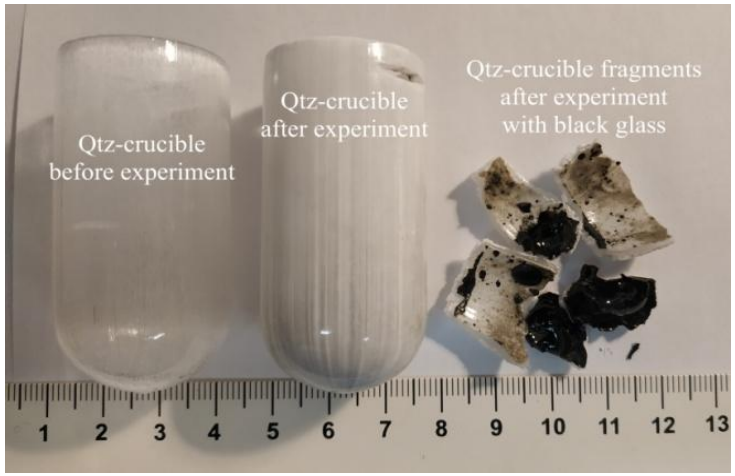
- на диаграмме указать составы, в которых равновесными фазами являлись составы мантийного расплава + (металлическая фаза железа).

Методика

Упрощенный модельный состав SiO_2-MgO-FeO, рассчитанный по данным McDonough, 2017

Состав исходной смеси, рассчитанный на 2 г.

FeO	MgO	SiO_2	Сумма, г
0,84	0,50	0,66	2



Состав исходной смеси:

- порошок кварца (SiO_2) (осч),
- оксид магния (MgO) (осч)
- оксалат железа (FeC_2O_4).

- Смесь из реактивов плавилась в кварцевых ампулах при T = 1505°C и P = 1 атм в высокотемпературной вертикальной трубчатой печи Nabertherm RHTV 1700 в ГЕОХИ РАН.
- Продукты эксперимента представляют стекло черного цвета со стеклянным блеском.

Природный ферробазальт

Состав (мас.%):	
SiO_2	49.18
Al_2O_3	13.12
CaO	8.40
MgO	4.98
Na_2O	2.68
K_2O	0.36
FeO	18.01
TiO_2	2.0
Сумма	98.73

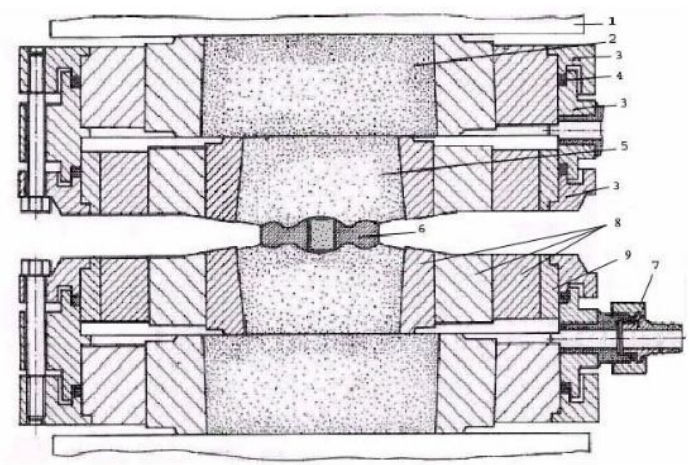
Ферробазальт № 11834 (Исландия, место отбора: кратер вершины севернее Лудента, район озера Миватн, север Исландской рифтовой зоны), из коллекции В.И. Герасимовского, А.И. Полякова, предоставленный Н.С. Муравьевой.

Аппаратура

Ячейка с графитовым нагревателем

Установка высокого давления «наковальня с лункой» (НЛ-13Т) с тороидальным уплотнением

Схема камеры твердофазового аппарата типа «наковальня с лункой» – тороид

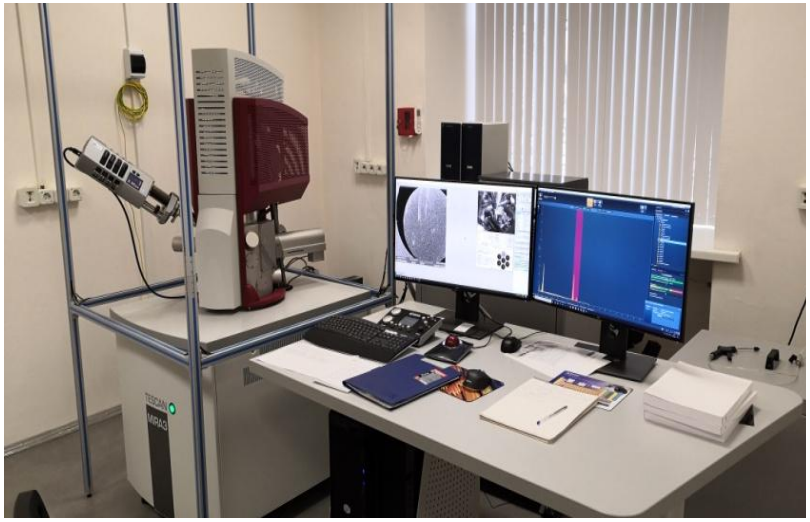


Система	Время (t), мин
SiO_2-MgO-FeO	40
Ферробазальт	60

1 - поршень пресса; 2 - опорная плита из твердого сплава ВК-15 (металлокерамический сплав на основе карбида вольфрама: WC-85, Co-15 мас. %); 3 - детали корпуса водяного охлаждения; 4 - герметизирующая прокладка корпуса охлаждения; 5 - рабочая матрица высокого давления из твердого сплава ВК-6 (WC-94, Co – 6 мас.%); 6 – ячейка с графитовым нагревателем; 7 - штуцер для подачи потока охлаждающей воды в зазор между блоками поддержки рабочей матрицы и опорной плиты; 8 - кольца поддержки рабочей матрицы (сталь 35ХГСА или 45ХМНФА); 9- кольцо безопасности (сталь 3) (Литвин, 1991)

Аналитика

- Для определения элементного состава твердых продуктов опытов использовался микроанализатор Cameca SX 100 с пятью волновыми спектрометрами и энерго-дисперсионной приставкой Bruker XFlash 6 в ГЕОХИ РАН.
- В качестве стандартов использовались образцы стекла основного состава Смитсоновского института (Glass XF2). Микрофотографии в обратно рассеянных электронах (BSE) получены при ускоряющем напряжение – 15 кВ и токе – 30 нА.



- Для изучения фазовых отношений и химического состава использовался аналитический сканирующий электронный микроскоп Tescan MIRA 3 в ГЕОХИ РАН. Растровые изображения в обратно-рассеянных электронах получены при ускоряющем напряжении 20 кВ, рабочей дистанцией – 15 кВ (0,8 нм) и интенсивности пучка – 14 мА.

Результаты экспериментов. Система SiO_2-MgO-FeO.

Исходное стекло, полученное в вертикальной трубчатой печи при 1505°C и 1 атм

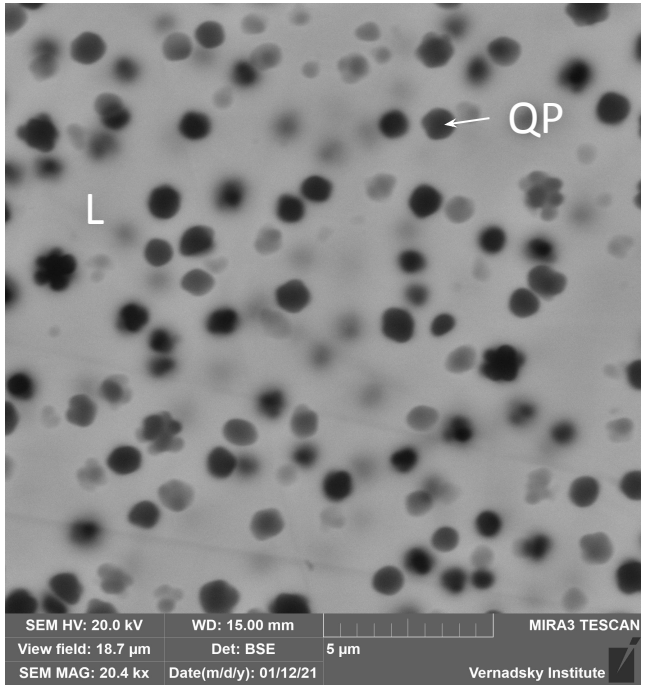
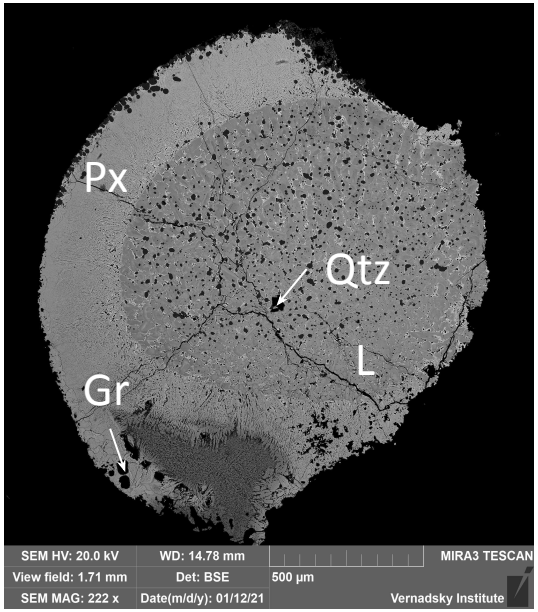


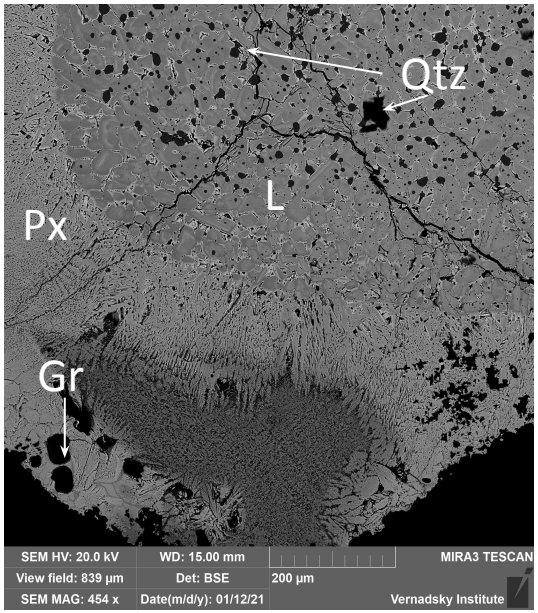
Таблица состава исходного стекла (данные микрозонда ИЭМ РАН)

SiO_2	51,96
MgO	13,84
FeO	32,52
Сумма	98,32

- В стекле основного состава (L), полученном при 1 атм, кристаллизуются мелкие закалочные фазы (quenching phases – QP) серого цвета в BSE до 1 мкм.
- Их состав близок к составу самого стекла. Истертое стекло бралось за основу для экспериментов на установке «наковальня с лункой».

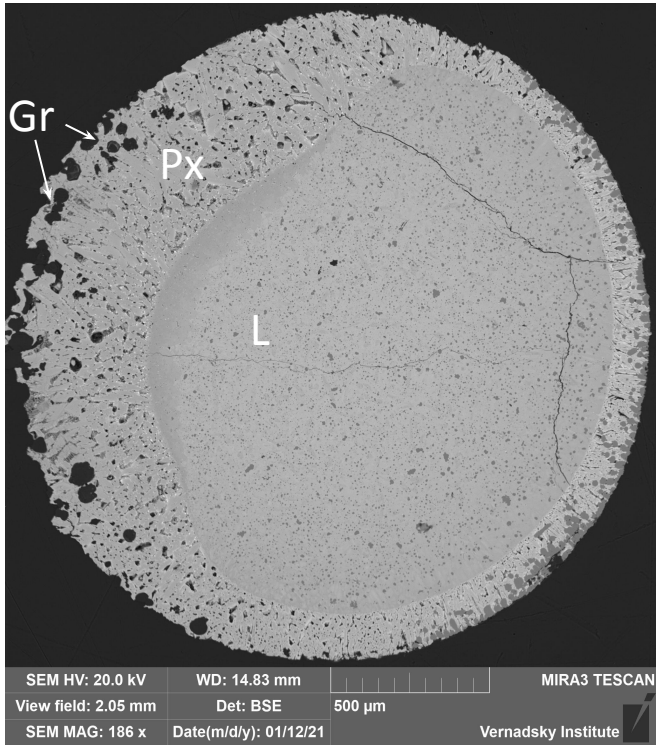
Эксперименты, проведенные при 1600°С и 2,5 ГПа





- Продукты опытов представлены закаленным стеклом светло-серого цвета. Размер образца в форме цилиндра составлял ~1,5 х 1,5 мм.
- Продукты экспериментов имеют зональное строение. В центральной зоне образца при температуре 1600°С и давлении 2,5 ГПа образуется закаленное стекло основного состава (L), внутри которого кристаллизуются округлые кристаллы кварца (Qtz) (~10-20 мкм).
- Краевая зона представлена кальциевым пироксеном, который образует удлиненные игольчатые и шестоватые кристаллы, а также по краям образца кристаллизуется графит округлой и овальной форм (~30 мкм), а также в виде мелких кристаллов.
- Данная система рассматривалась в присутствии графитовой фазы. Графит частично проник в краевую зону от графитового нагревателя. Он встречается в виде округлых кристаллов до 30 мкм черного цвета в BSE.
- Данный результат является случаем кристаллизации в области нестабильности металлической фазы.

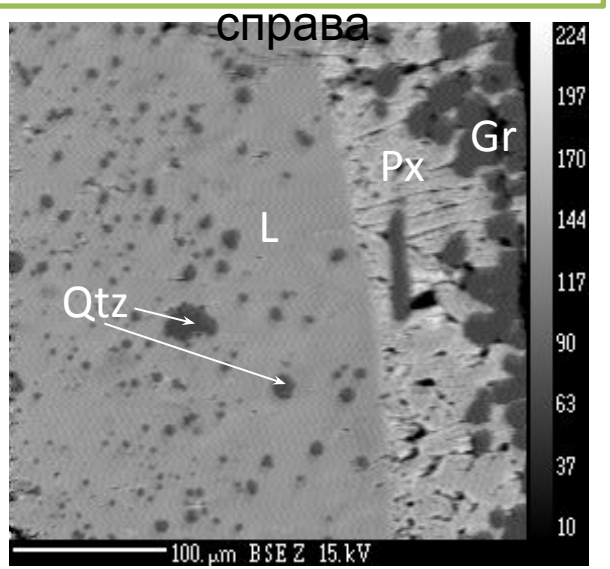
Эксперименты, проведенные при 1600°C и 3 ГПа



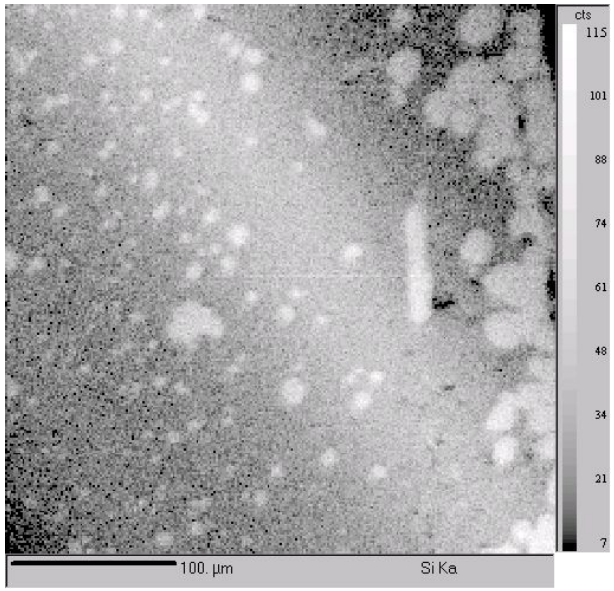
- В экспериментах при 1600°C и 3 ГПа фазовые отношения остались прежними, но в центральной зоне кристаллы кварца стали меньше (~ 10 мкм).
- Кристаллы пироксена в краевой зоне стали крупнее, их размер доходил до 80 мкм в ширину и ~200 мкм в длину.
- Захваченные кристаллы графита достигали 80 мкм в поперечнике.

Содержания главных компонентов системы (Si, Mg, Fe, (Ca)) центральной и краевой зон (справа). Параметры эксперимента: T = 160[illegible] P = 3 ГПа.

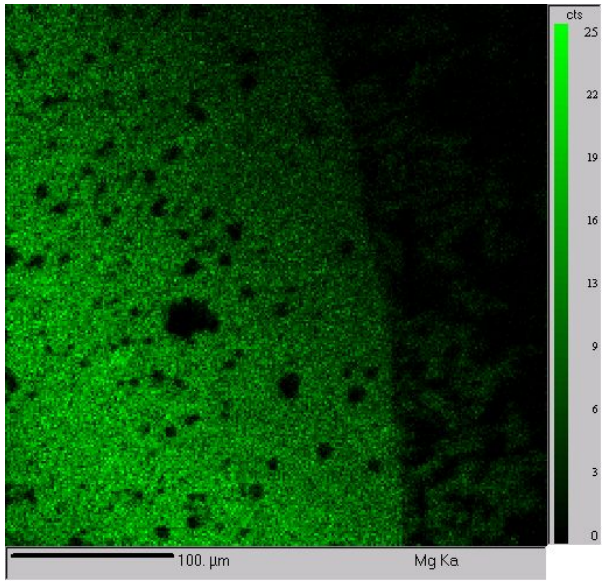
Общий вид образца справа



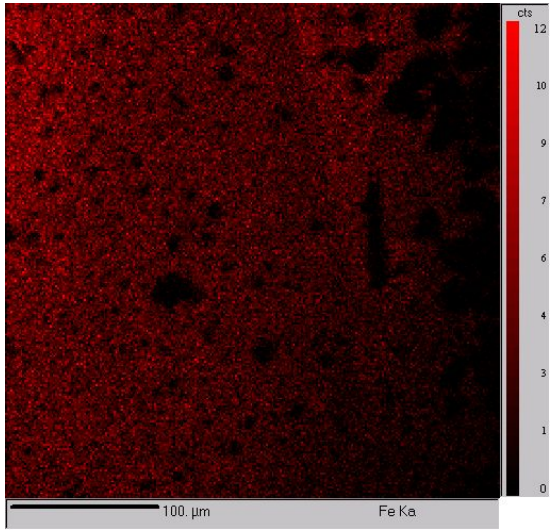
Si



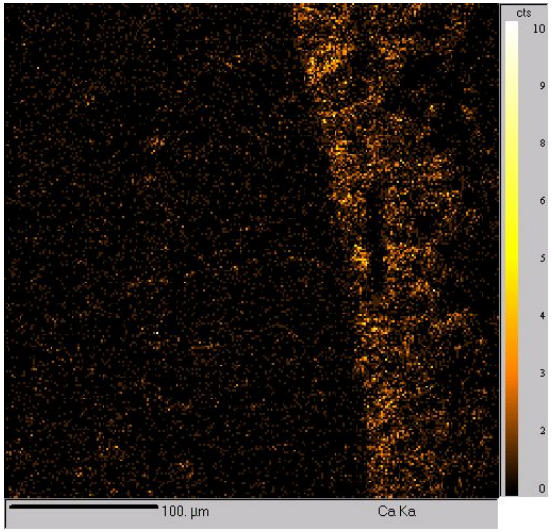
Mg



Fe

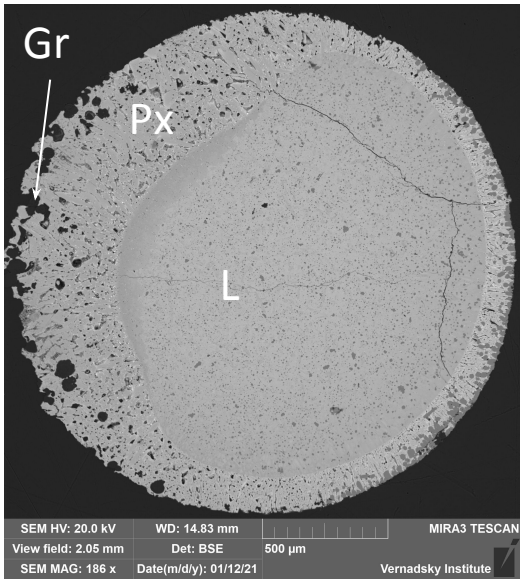


Ca

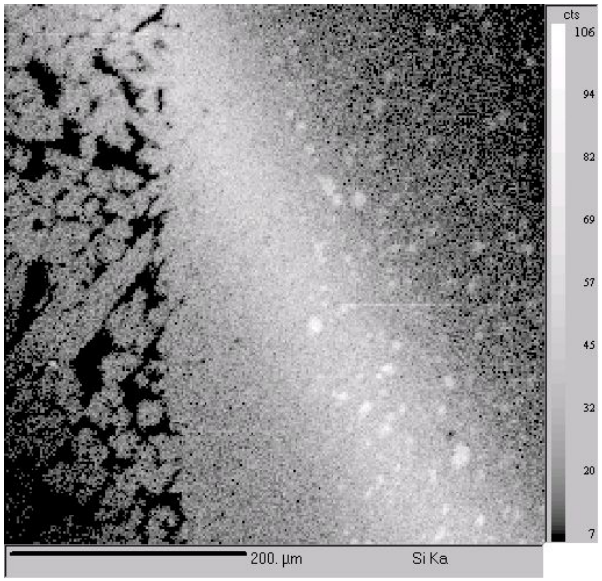


Содержания главных компонентов системы (Si, Mg, Fe, (Ca)) центральной и краевой зон (слева). Параметры эксперимента: T = 1600 °C, P = 3 ГПа.

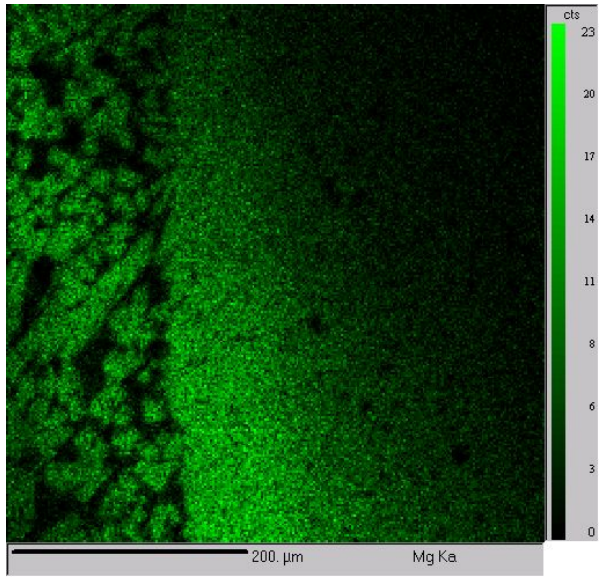
Общий вид образца



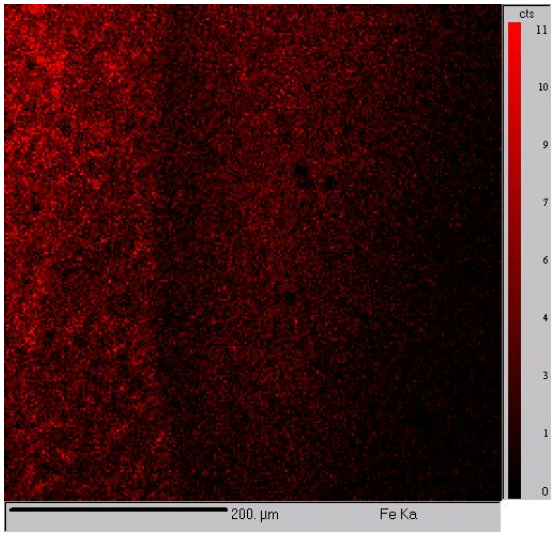
Si



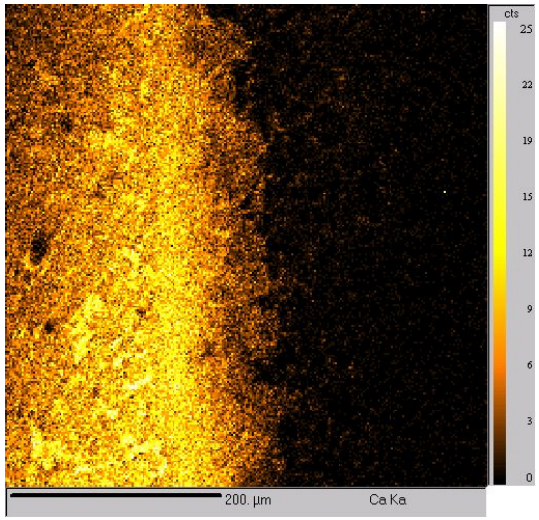
Mg



Fe



Ca

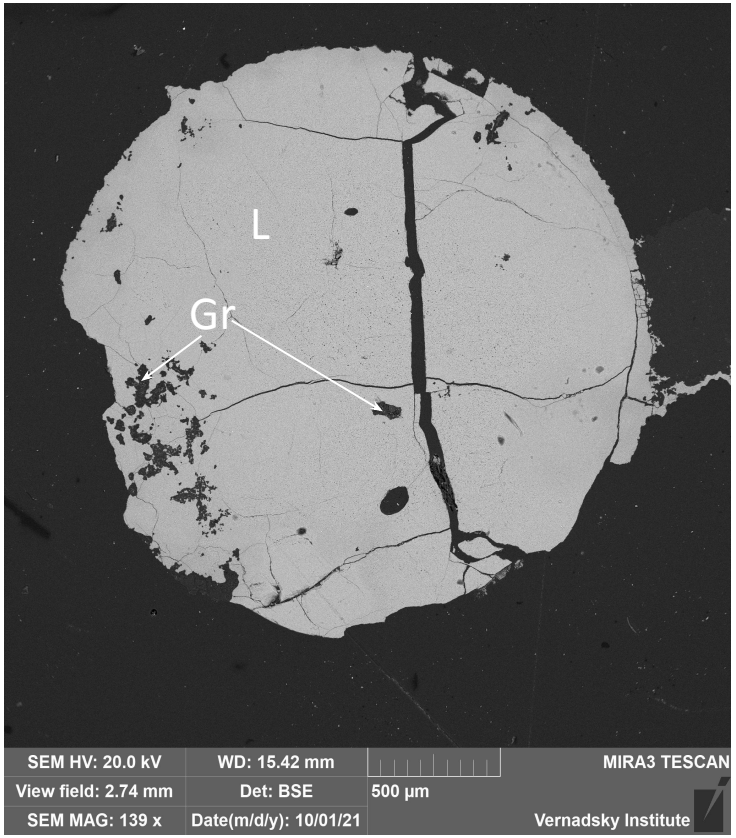


Средние составы стекол, полученных при 1 атм, в трубчатой печи и средние составы стекол, полученные в экспериментах при T = 1600 °C и P = 2,5 и 3 ГПа.

№ оп.	Состав	SiO_2	MgO	FeO	Сумма
Исх. стекло (а)	X (10)	51,36	15,48	33,17	100
	S (10)	2,50	0,91	1,59	
138 (б)	X (4)	52,08	20,40	27,47	100
	S (4)	0,60	1,58	2,14	
159 (в)	X (3)	54,24	16,12	29,64	100
	S (3)	0,14	0,15	0,01	

Условные обозначения: а) Средние составы исходных стекол; б) Средние составы стекла в центральной зоне образца (оп.138); в) Средние составы стекла в центральной зоне образца (оп. 159). Тэксп. = 1600°C, P = 2,5 и 3 ГПа. Данные указаны в мас.%. X – средние значения, S – стандартные отклонения. Данные, указанные в скобках, обозначают количество анализов.

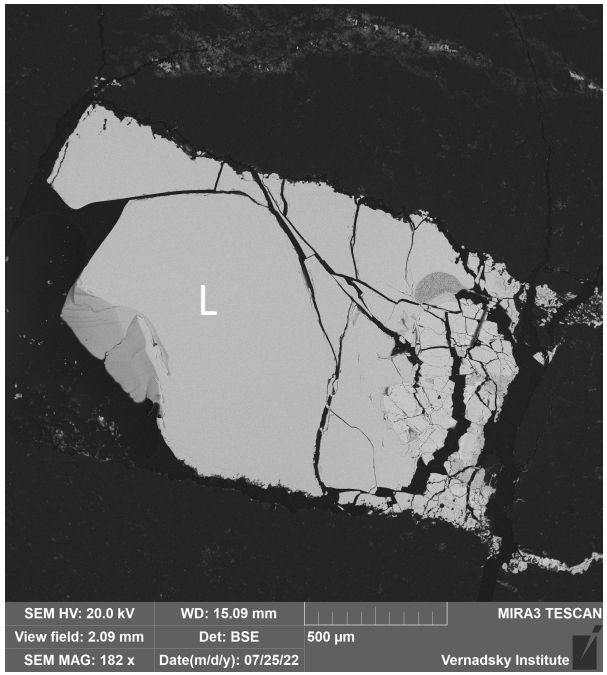
Эксперименты, проведенные при 1500°C и 3 ГПа

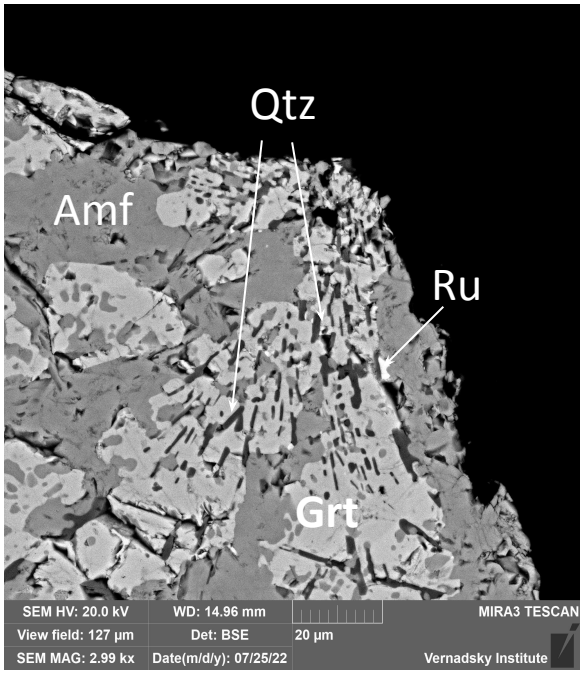


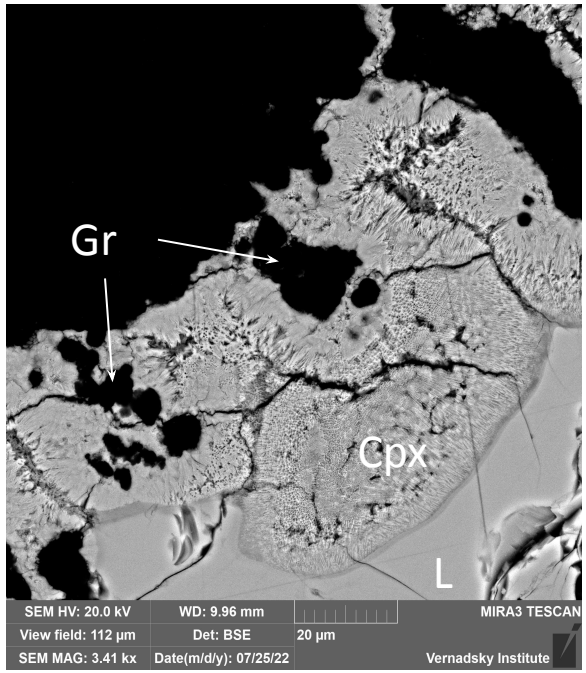
- Структура образца изменяется, она становится однородной и пористой.
- Пироксен и кварц не образуются, остается стекло, содержащее CaO.
- При 1500°C и 3 ГПа кальций мигрирует в образец. Содержание кальция доходило до 29 мас.% в образце.
- Встречаются крупные кристаллы графита, которые преимущественно находятся в краевой зоне образца, также встречаются крупные кристаллы в центральной части.
- Возможно, кристаллы графита были захвачены расплавом в процессе эксперимента.

Эксперименты с природным ферробазальтом при 1500°С и 4 ГПа

Продукты экспериментов при 1500°С и 4 ГПа







- Продукты экспериментов представлены гомогенным закаленным расплавом основного состава - L (стекло) (большая часть образца), кристаллами гранатов (Grt), амфиболов (Amf), TiO_2 (Ru - рутилом), кварцем (Qtz) (по PT диаграмме для SiO_2 (Hemley et al, 1994) кварц соответствует полиморфной модификации коэсита), дендритами клинопироксена (Cpx) (закалочная зона образца на контакте с графитовым нагревателем) и по краям образца - карбонат от вещества тороида (carb). Кальций мигрировал в образец, что усложнило пересчет составов фаз по стехиометрии.

Составы полученного стекла в эксперименте с ферробазальтом

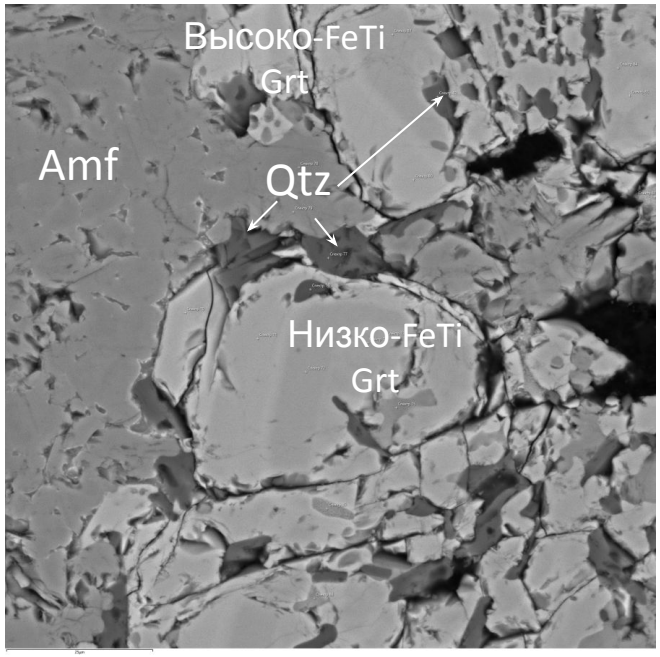
Средние составы стекол (L), измеренные в точке, полученные в эксперименте при T = 1500 °C и P = 4 ГПа.

L в точке, мас.%	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	FeO	TiO_2	CaO	MnO	Сумма
X (6)	48.35	10.98	3.34	1.70	0.44	17.40	2.86	14.76	0.17	100
S (6)	2.46	0.68	0.32	0.42	0.09	0.92	0.09	2.79	0.14	

Средние составы стекол (L по S), измеренные по площади, полученные в эксперименте при T = 1500 °C и P = 4 ГПа.

L по S, мас.%	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	FeO	TiO_2	CaO	MnO	Сумма
X (7)	50.27	12.56	3.65	2.32	0.45	17.22	2.76	10.61	0.15	100
S (7)	2.05	0.79	0.13	0.12	0.09	0.87	0.11	2.07	0.14	

Условные обозначения: X – средние значения, S – стандартные отклонения. Данные в скобках указывают на количество анализов.



- При исследовании составов гранатов было обнаружено, что гранаты по содержанию титана и железа можно разделить на **две группы:**
- на <u>высоко железо-титанистые</u>
- на <u>низко железо-титанистые</u>.
- Некоторые кристаллы были зональные. Низко-железотитанистые гранаты более темного цвета на изображении в BSE, а высоко-железотитанистые – более светлые.

Средние составы низко- Fe+Ti гранатов, измеренные в точке, полученные в эксперименте при T = 1500 °C и P = 4 ГПа.

Низко-Fe+Ti Grt	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	FeO	TiO_2	CaO	MnO	Сумма
X (16)	38.48	20.65	7.75	0.12	0.00	21.55	0.97	9.94	0.54	100
S (16)	1.80	1.11	1.33	0.46	0.00	2.27	0.23	2.20	0.07	

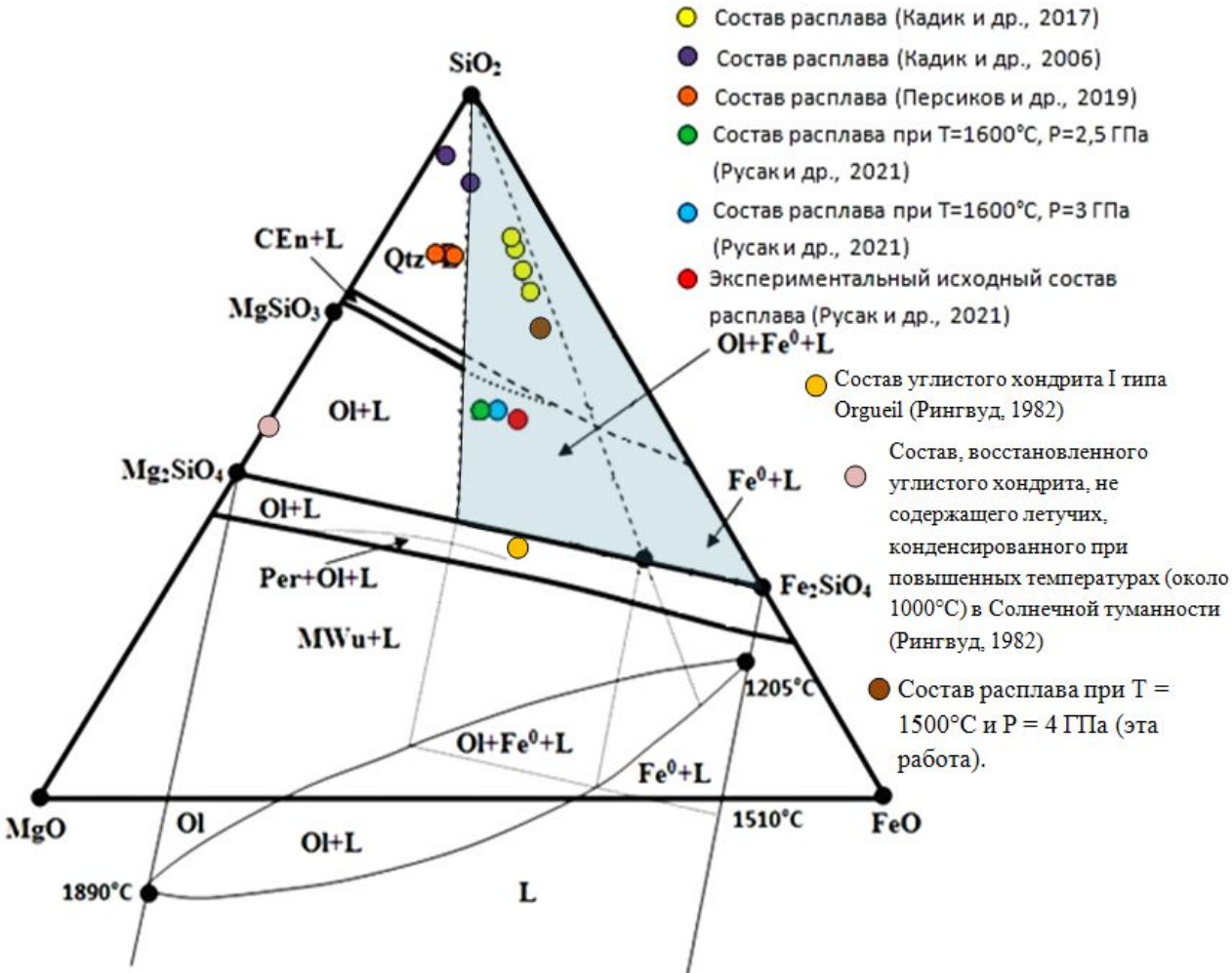
Средние составы высоко- Fe+Ti гранатов, измеренные в точке, полученные в эксперименте при T = 1500 °C и P = 4 ГПа.

Высоко-Fe+Ti Grt	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	FeO	TiO_2	CaO	MnO	Сумма
X (14)	37.48	19.66	5.41	0.00	0.00	26.35	2.08	8.46	0.56	100
S (14)	0.32	0.36	0.88	0.00	0.00	1.28	0.30	0.23	0.05	

Металлическая фаза

- В настоящих опытах металлические капли не образовались (открытая система, контакт образца с графитовым нагревателем), летучесть кислорода соответствовала буферу ССО.
- Однако первоначально состав системы SiO_2-MgO-FeO и состав природного ферробазальта отвечали составу восстановленных магм, поэтому было решено эти экспериментальные данные использовать в качестве реперных значений для внесения их на диаграмму плавкости.

Диаграмма плавкости для системы SiO_2-MgO-FeO (мас. %), на которой показана область возможного выделения металлической фазы железа при восстановительных условиях



Составы расплавов: красный кружок – исходный состав системы SiO_2-MgO-FeO; голубой – T = 1600°C, P = 3 ГПа; зеленый – T = 1600°C, P = 2,5 ГПа (Русак и др., 2021, 2022; Rusak et al., 2021, 2022); желтые кружки – составы расплава по работе (Кадик и др., 2017); оранжевые – составы расплава по данным работы (Персиков и др., 2019); фиолетовые – составы расплава по работе (Кадик и др., 2006); розовый кружок – состав восстановленного углистого хондрита (Рингвуд, 1982); желто-оранжевый – состав углистого хондрита I типа Orgueil (Рингвуд, 1982); коричневый – экспериментальный состав расплава (исходный состав – природный ферробазальт), полученный при T = 1500°C и P = 4 ГПа (данные получены в этой работе).

Условные обозначения: L – расплав, Qtz – кварц (SiO_2), Per – периклаз (MgO), Wu – вюстит (FeO), MWu – магнезиовюстит ((Mg,Fe)O), CEn – клиноэнстатит ($MgSiO_3$), Ol – оливин (Mg_2SiO_4 (форстерит) – Fe_2SiO_4 (фаялит)), Fe^0 – – металлическое железо.

По тройной диаграмме SiO_2-MgO-FeO можно увидеть следующую закономерность (тренд), что чем выше летучесть кислорода, тем больше в расплаве находится FeO, и наоборот, чем ниже летучесть кислорода, тем лучше железо образует отдельную металлическую фазу, и тем меньше FeO в расплаве.

Металлическое железо в природных магмах

- В природе существуют базальты, в которых находятся довольно крупные скопления железа, например, остров Диско в Западной Гренландии. По выражению Э.М. Спиридонова «остров Диско - это природный металлургический процесс». Вопрос происхождения таких месторождений остается дискуссионным. Одна из точек зрения, взаимодействие платобазальтов с угленосной толщей, залегающей на метаморфитах. Такие скопления железа могли образоваться при летучести кислорода близкой к буферу ССО, но при низких давлениях.
- Скопления самородного железа в виде сфер металла встречаются в базитах Североамериканской и Сибирской платформ (Bird et al., 1981; Левашов и др., 1984; Олейников и др., 1985), также самородки железа находили в базальтовом карьере в Бюле (Германия).

Выводы

1. Эксперименты, проведенные на установке «наковальня с лункой» в открытой системе без платиновых капсул, не позволяют получить отдельную металлическую фазу железа при буферировании системы углеродом (CCO буфер), потому что эта область находится выше буфера железо-вюстит (IW).
2. В экспериментах системы SiO_2-MgO-FeO-C-H получены стекла, содержащие оксид кальция, при T = 1600°C и P = 2,5-3 ГПа кристаллизуется фаза кальциевого пироксена по краям образца и графит, в виде вкрапленников, центральная зона представлена стеклом и кристаллами кварца (β-кварц), при T = 1500°C и P = 3 ГПа структура стекла становится однородной и пористой с крупными вкрапленниками графита.
3. В экспериментах с природным ферробазальтом кристаллизовались следующие фазы: закаленный расплав основного состава, гранат, амфибол, клинопироксен, рутил (?) и кварц (коэсит). При температуре 1500°C и давлении 4 ГПа образуются зональные гранаты, которые можно разделить на две группы: на высоко- и на низко железо-титанистые. Краевые зоны граната обогащены железом и титаном, но обеднены магнием, тогда как магний преимущественно концентрируется во внутренней зоне кристаллов. Графит кристаллизуется между скелетными закалочными кристаллами клинопироксена. Металлическая фаза отсутствует.
4. На построенной тройной диаграмме плавкости SiO_2-MgO-FeO рассмотренной системы, точки составов экспериментальных образцов попадают в область стабильности расплава, кристаллов оливина и металлической фазы Fe^0. Экспериментальный состав расплава, отвечающий природному ферробазальту, находится в равновесии с расплавом и кристаллами кварца.
5. По экспериментальным данным и составам расплавов рассмотренных работ видно, что уменьшение летучести кислорода ведет к выделению металлической фазы и соответственно изменению состава расплава по содержанию кремнезема от базальтового к андезитовому и уменьшению FeO в расплаве, поскольку преимущественно всё восстановленное железо уходит

Применение полученных результатов

- Описанная методика проведения экспериментов может использоваться в качестве краткого пособия (УМК) по работе на установке «наковальня с лункой»;
- Полученные результаты могут быть востребованы при построении моделей дифференциации раннего вещества Земли.

Планы

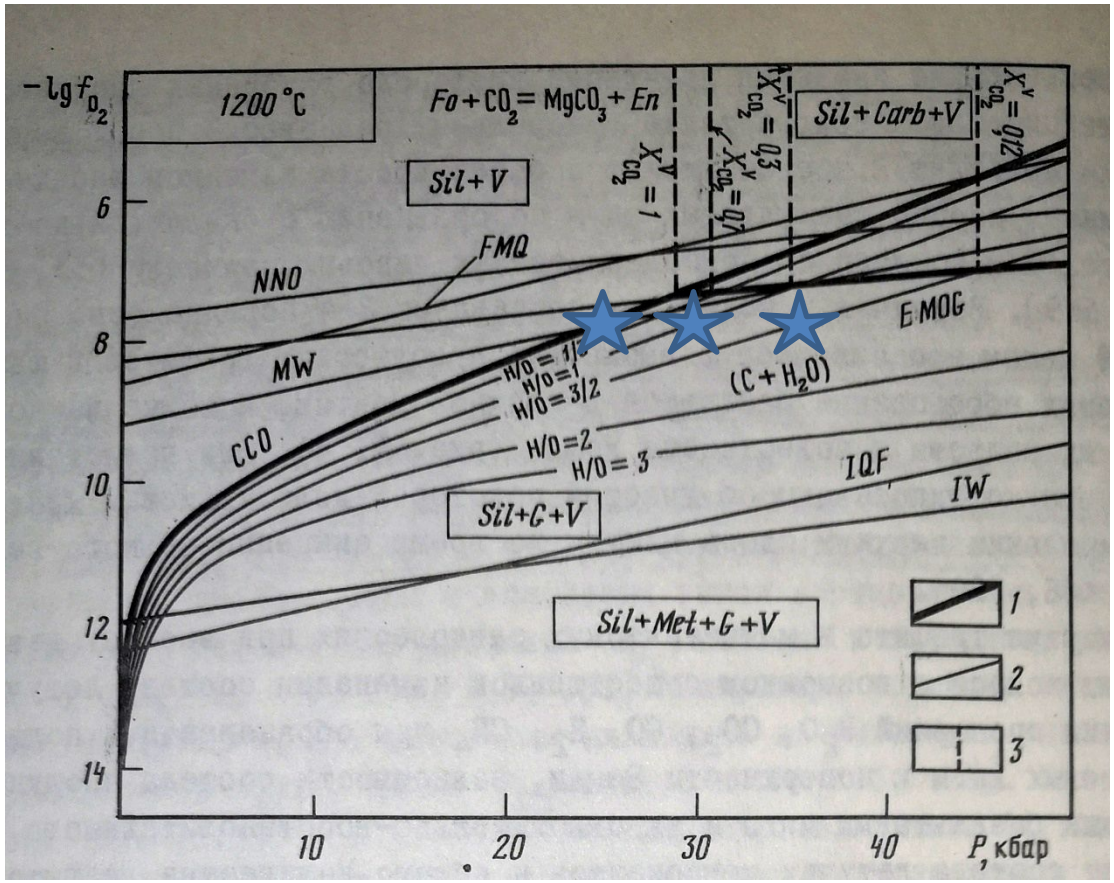
- Планируется делать новые втулки для «наковальни с лункой» из прессованных MgO и BN, чтобы CaO не мигрировал в образец;
- После калибровки новой сборки ансамбля планируется провести серию экспериментов с составом SiO_2-MgO-FeO-SiC, варьируя содержание SiC (3, 5, 7 мас.%), на установке «наковальня с лункой», чтобы создать летучесть кислорода ниже буфера железо-вюстит на одну, две логарифмические единицы (fO_2 < IW -1, -2) и получить металлические капли железа в расплаве; а также планируется провести такие же эксперименты только с TiH_2 в количестве 3 и 5 мас. %.
- Планируется провести эксперименты с подобными составами на установке «цилиндр-поршень» с буфером IW + H_2O, чтобы изучить фазовый состав системы и оценить влияние C-O-H летучих на дифференциацию мантийных расплавов.
- Нанести все полученные данные на диаграмму, проследить изменение состава расплавов при разных летучестях кислорода.

Публикации

- *Русак А.А.* Изучение плавления мантийного вещества Земли при высоких температурах и давлениях в восстановительных условиях (экспериментальное исследование) // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2021 / Под ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова. — Москва: Москва, 2021. — С. 1–1.
- Русак А.А., Луканин О.А., Каргальцев А.А., Кононкова Н.Н. Плавление и кристаллизация состава, отвечающего среднему составу силикатной Земли, в системе SiO_2-MgO-FeO в присутствии графита при высоких температурах и давлениях // *Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика», Иркутск, 11–16 мая 2021 г* (2021), ИЗК СО РАН Иркутск, Институт земной коры СО РАН, с. 223–225.
- Русак А.А., Луканин О.А., Кононкова Н.Н., Каргальцев А.А. Экспериментальное изучение упрощенного состава SiO_2-MgO-FeO, отвечающего среднему составу силикатной Земли, в присутствии графита и карбоната кальция при высоких термодинамических параметрах // *ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ВСЕРОССИЙСКОГО ЕЖЕГОДНОГО СЕМИНАРА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ, ПЕТРОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ (ВЕСЭМПГ-2021, Москва, 25-26 мая 2021 г.)* (2021), ГЕОХИ Москва, с. 108–108.
- Русак А.А., Луканин О.А., Кононкова Н.Н., Каргальцев А.А. Экспериментальное изучение плавления модельного состава SiO_2-MgO-FeO, в присутствии графита и карбоната кальция, при высоких термодинамических параметрах // *Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2021)* (2021), ГЕОХИ РАН Москва, с. 73–76.
- Rusak A.A., Lukanin O.A., Kononkova N.N., Kargaltsev A.A. Experimental study of the melting of the SiO_2-MgO-FeO model composition, in the presence of graphite and calcium carbonate, at high thermodynamic parameters // ***Experiment in GeoSciences 27***, 1 (2021), 98–101.
- Русак А.А. Обобщенные данные по влиянию C-O-H летучих компонентов на дифференциацию мантийных магм (восстановительные условия) // *ЛОМОНОСОВ - 2022. Сборник тезисов XXIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, место издания МГУ имени Ломоносова, Москва, тезисы* (2022), с. 1–2.
- Русак А.А., Луканин О.А. Экспериментальное изучение силикатных расплавов базитового состава и модельной системы SiO_2-MgO-FeO-C, равновесных с жидким сплавом железа // *ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ВСЕРОССИЙСКОГО ЕЖЕГОДНОГО СЕМИНАРА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ, ПЕТРОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ (ВЕСЭМПГ-2022),* Москва, 19-20 апреля 2022 г. — ГЕОХИ РАН Москва, 2022. — С. 104–104.
- Русак А. А., Луканин О. А. Экспериментальное изучение силикатных расплавов базитового состава и модельной системы SiO_2-MgO-FeO-C, равновесных с жидким сплавом железа // *Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2022),* место издания *ГЕОХИ РАН Москва (в печати)*
- Rusak A. A., Lukanin O. A. Experimental study of silicate melts of basalt composition and SiO_2-MgO-FeO-C model system in equilibrium with a liquid iron alloy // ***Experiment in GeoSciences 28***, 2022 (в печати)
- Русак А.А., Луканин О.А. Экспериментальное изучение силикатных расплавов модельной системы SiO_2-MgO-FeO и природного ферробазальта при высоких давлениях и температурах // Материалы XXIII Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 2022 (в печати)

Спасибо за внимание!
Жду Ваши вопросы!

Кекертарсуак, Западная Гренландия, о. Диско



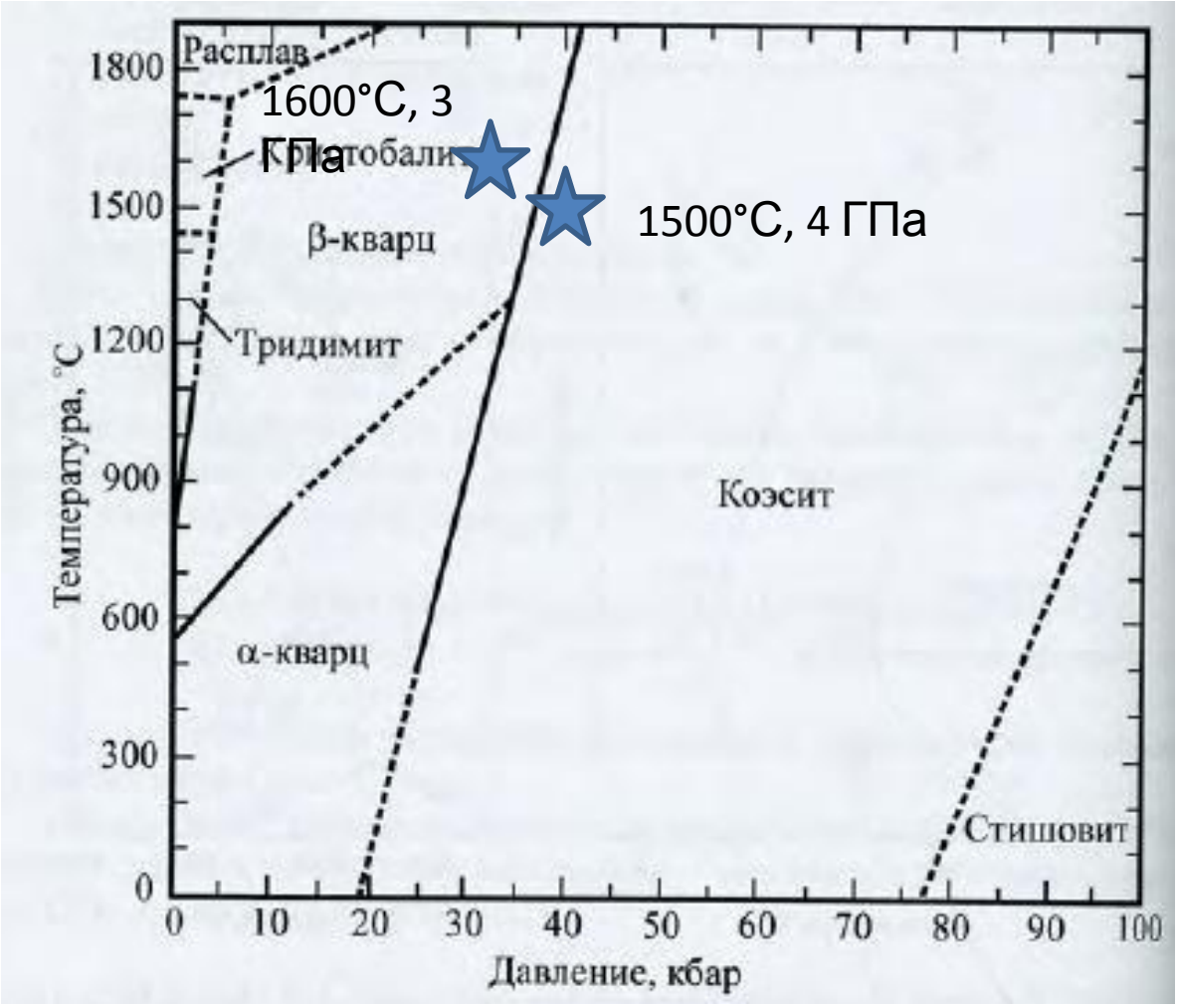
Поля стабильности графита и карбоната в системе Fo - En - C-O-H в зависимости от летучести кислорода и давления при температуре 1200 °C (Кадик и др., 1986).

1 – линия графитового буфера CCO, определяющая верхний по фугитивности кислорода предел стабильности магнезита;

2- fO_2 для различных буферных ассоциаций, в также для равновесия графит-флюидная фаза при фиксированных атомных отношениях HO;

3 – равновесие форстерит + CO_2 = магнезит+энстатит при различной доле CO_2 (X^V_{CO2}) во флюидной фазе; Sil+Carb+V, Sil+Carb+V, Sib+V – поля стабильности различных минеральных ассоциаций мантийного вещества, содержащего летучие компоненты группы C-O-H (Кадик и др., 1990).

Фазовая диаграмма для SiO_2



Hemley et al., 1994