



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 мантейных 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

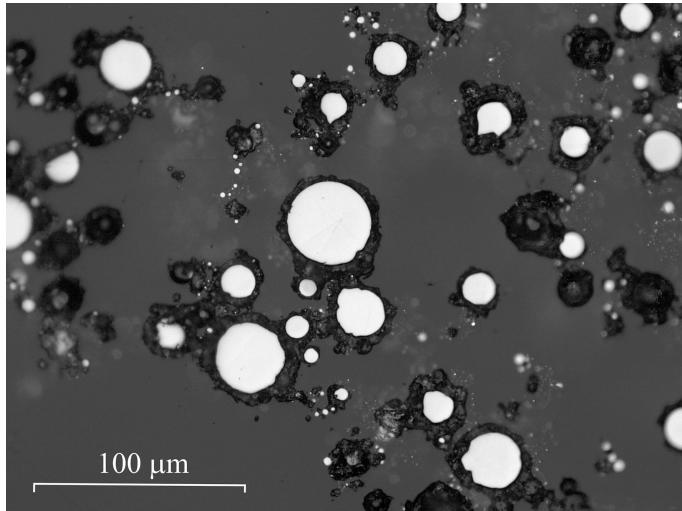
Введение

- 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 С-О-Н (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, $T = 1550^\circ\text{C}$, $\lg f_{\text{O}_2} = \text{IW}-2.9$, 7 мас. % SiC (Луканин и др., 2020).

- Ранее в экспериментах, проведенных при $T = 1550^\circ\text{C}$ 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 глобулы, 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 + H₂O) 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 $T = 1500^\circ\text{C}$ 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$, рассчитанный по данным McDonough, 2017

Состав исходной смеси, рассчитанный на 2 г.

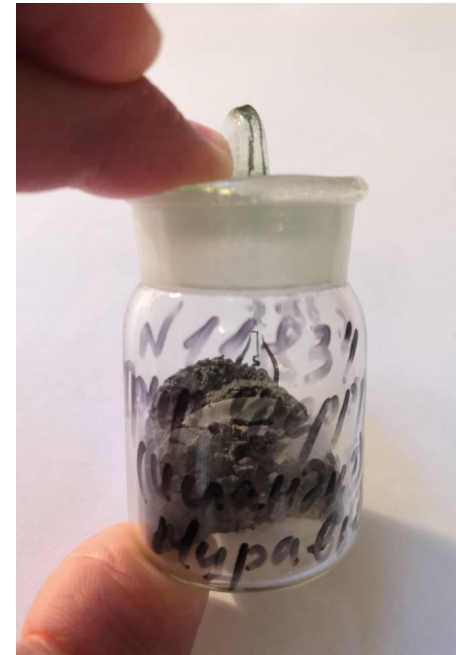
| FeO | MgO | SiO ₂ | Сумма, г |
|------|------|------------------|----------|
| 0,84 | 0,50 | 0,66 | 2 |



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 $T = 1505^\circ\text{C}$ и $P = 1$ атм в высокотемпературной вертикальной трубчатой печи Nabertherm RHTV 1700 в ГЕОХИ РАН.
- Продукты эксперимента представляют стекло черного цвета со стекляннным блеском.

Природный ферробазальт



| Состав (мас. %): | |
|--------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 49.18 |
| Al ₂ O ₃ | 13.12 |
| CaO | 8.40 |
| MgO | 4.98 |
| Na ₂ O | 2.68 |
| K ₂ O | 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

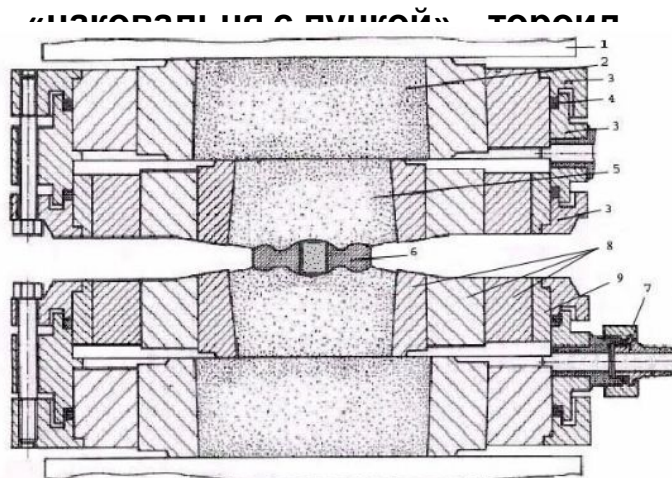
Ячейка с графитовым нагревателем



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



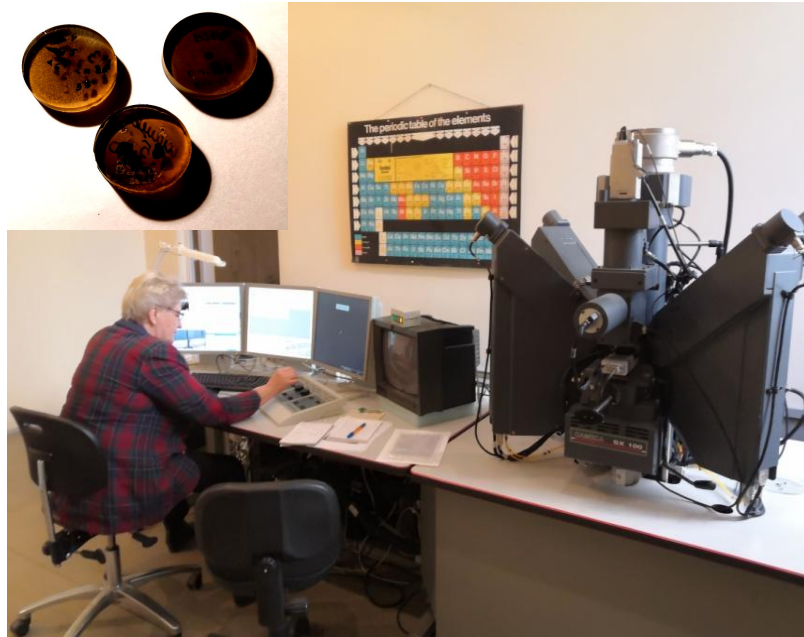
Схема камеры твердофазового аппарата типа «наковальня с лункой» тороид



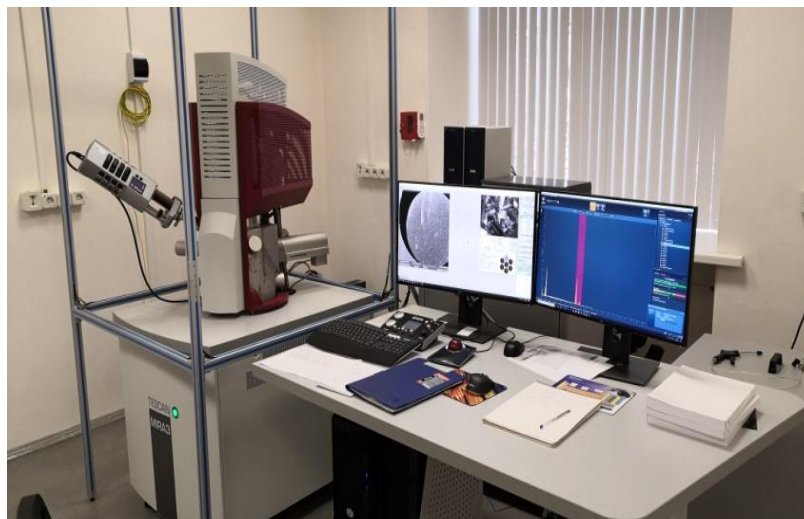
| Система | Время (t), мин |
|---------------------------|----------------|
| SiO ₂ -MgO-FeO | 40 |
| Ферробазальт | 60 |

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 напряжении – 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

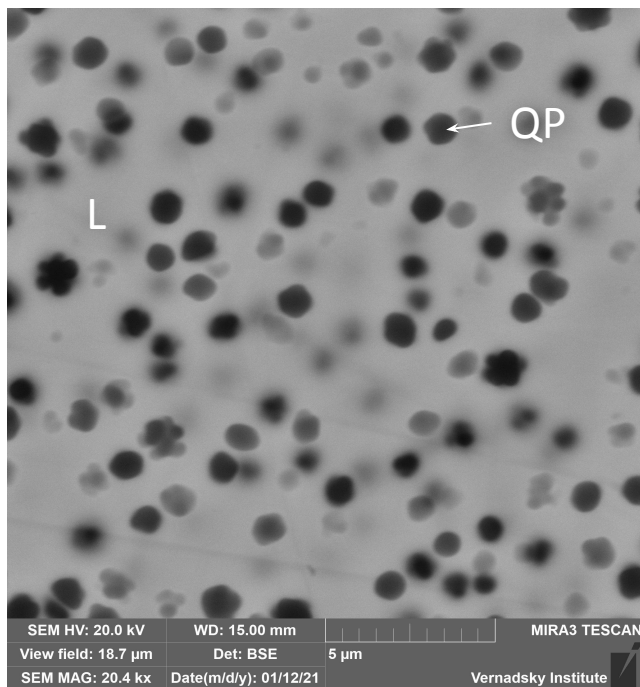
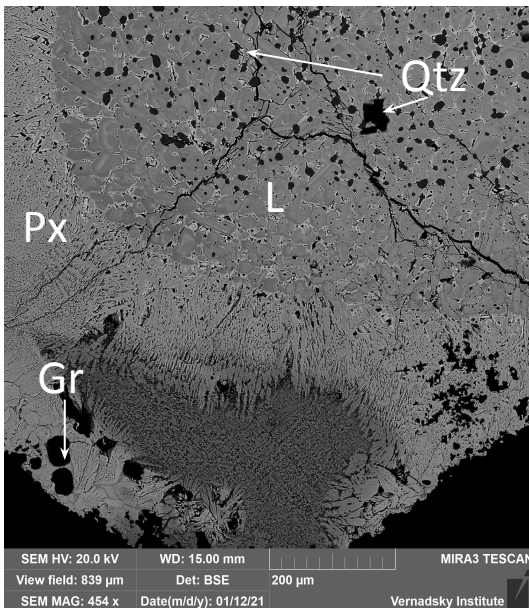
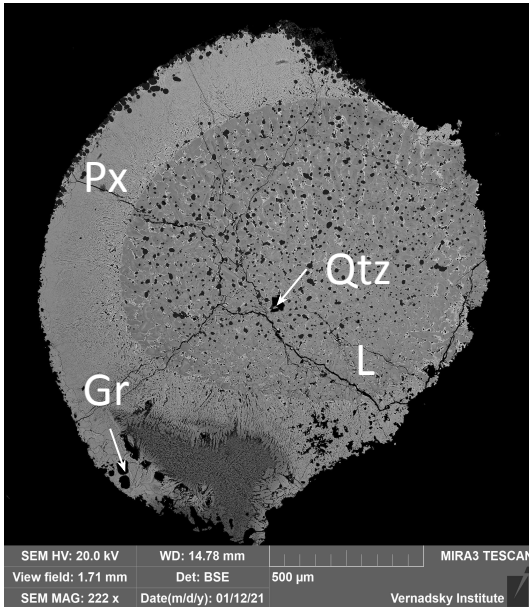


Таблица состава исходного стекла (данные микрозонда ИЭМ

| | |
|------------------------|-------|
| SiO ₂ (РАН) | 51,96 |
| MgO | 13,84 |
| FeO | 32,52 |
| Сумма | 98,32 |

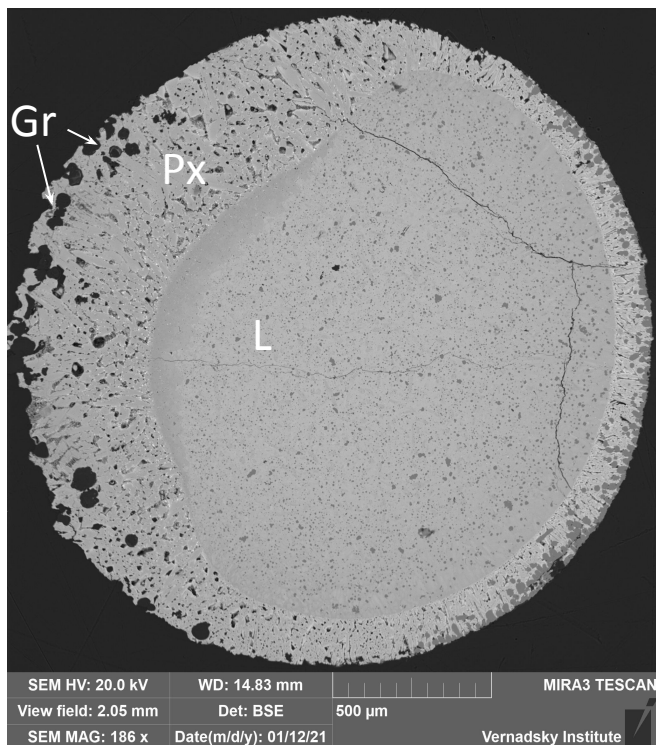
- В стекле основного состава (L), полученном при 1 атм, кристаллизуются мелкие закалочные фазы (quenching phases – QP) серого цвета в BSE до 1 мкм.
- Их состав близок к составу самого стекла. Истертое стекло бралось за основу для экспериментов на установке «наковальня с лункой».

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



- Продукты опытов представлены закаленным стеклом светло-серого цвета. Размер образца в форме цилиндра составлял ~1,5 x 1,5 мм.
- Продукты экспериментов имеют зональное строение. В центральной зоне образца при температуре 1600°C 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 неустойчивости металлической фазы.

Эксперименты, проведенные при 1600°C и 3 ГПа

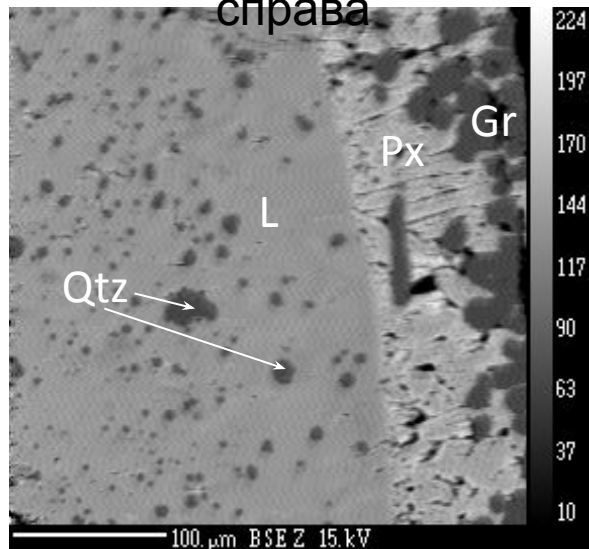


- В экспериментах при 1600°C и 3 ГПа фазовые отношения остались прежними, но в центральной зоне кристаллы кварца стали меньше (~ 10 мкм).
- Кристаллы пироксена в краевой зоне стали крупнее, их размер доходил до 80 мкм в ширину и ~200 мкм в длину.
- Захваченные кристаллы графита достигали 80 мкм в поперечнике.

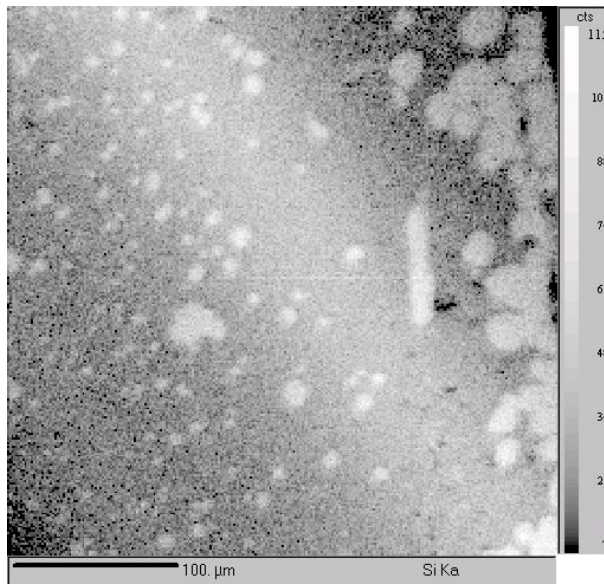
**Содержания главных компонентов системы (Si, Mg, Fe, (Ca))
центральной и краевой зон (справа). Параметры эксперимента: $T = 1600^\circ\text{C}$, $P = 3 \text{ ГПа}$.**

Общий вид образца

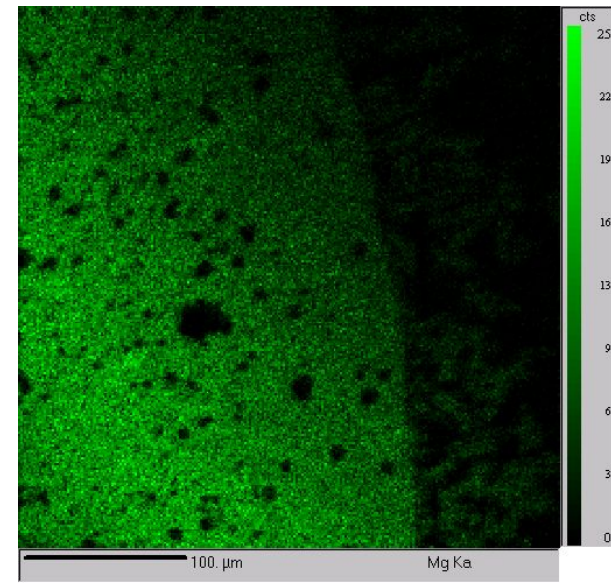
справа



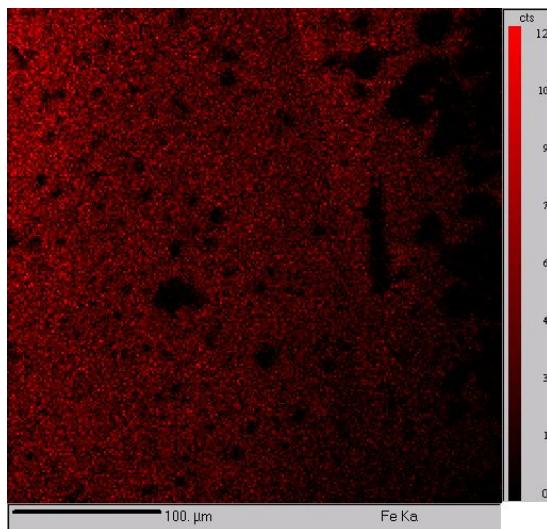
Si



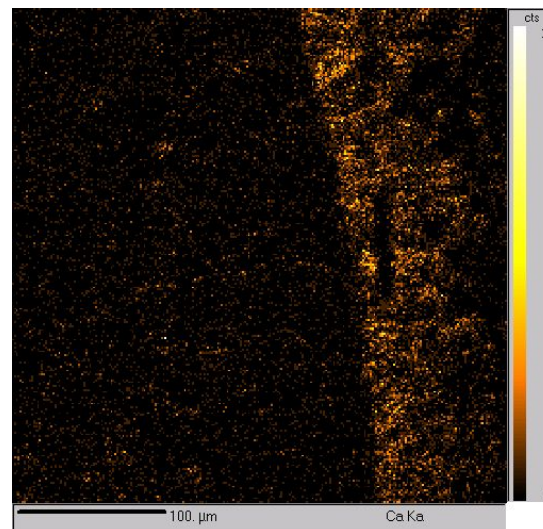
Mg



Fe

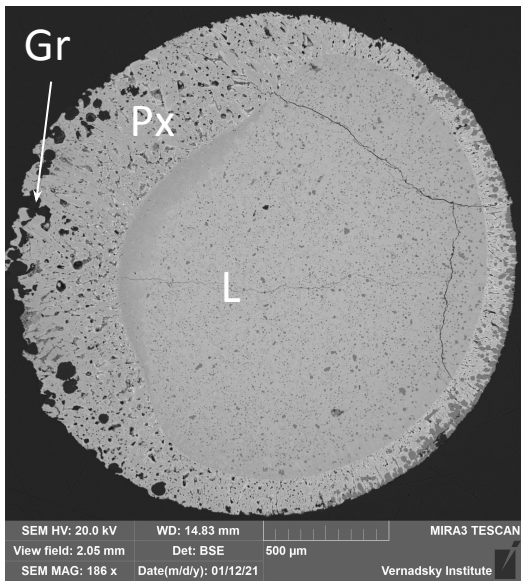


Ca

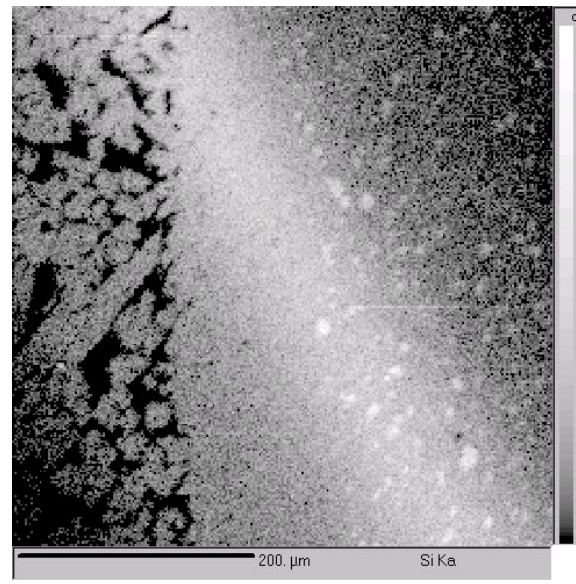


**Содержания главных компонентов системы (Si, Mg, Fe, (Ca))
центральной и краевой зон (слева). Параметры эксперимента: $T = 1600^{\circ}\text{C}$, $P = 3$ ГПа.**

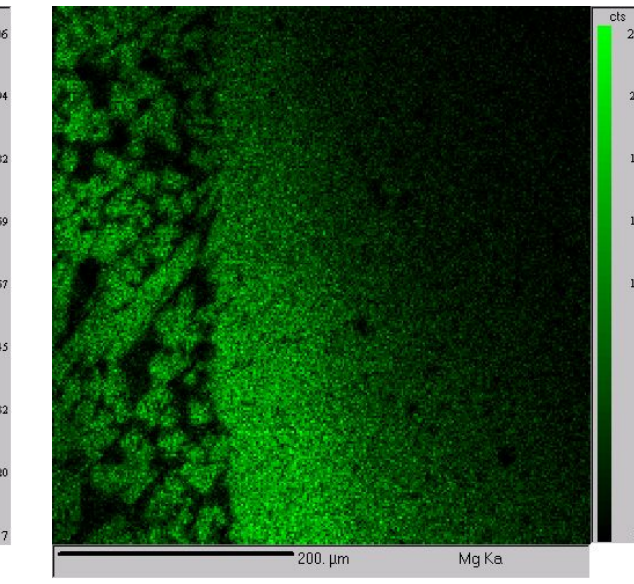
Общий вид образца



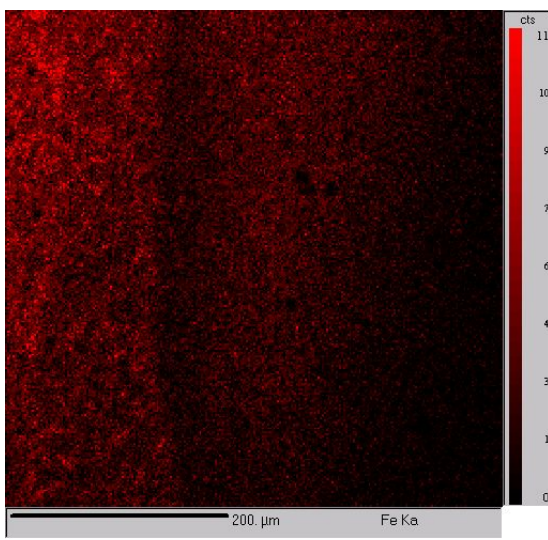
Si



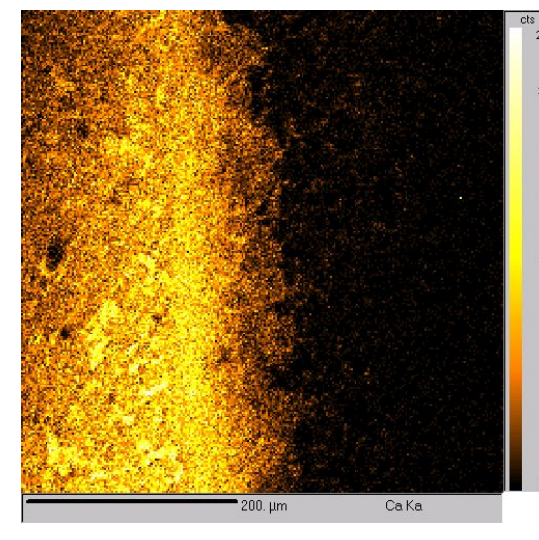
Mg



Fe



Ca

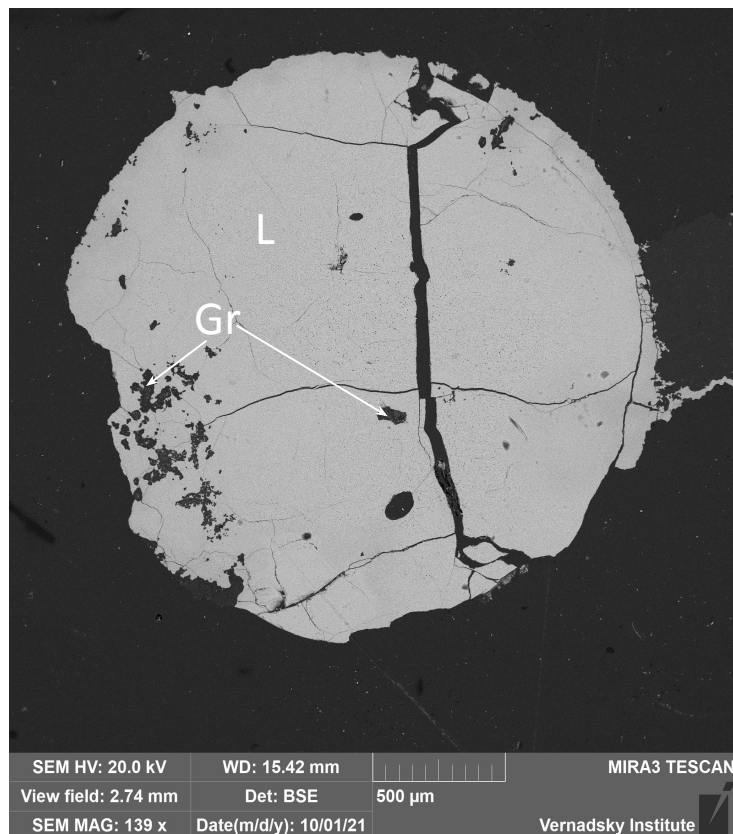


**Средние составы стекол, полученных при 1 атм, в
трубчатой печи и средние составы стекол,
полученные в экспериментах при $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 2,5$
и 3 ГПа.**

| № 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°С, P = 2,5 и 3 ГПа. Данные указаны в мас.%. X – средние значения, S – стандартные отклонения. Данные, указанные в скобках, обозначают количество анализов.

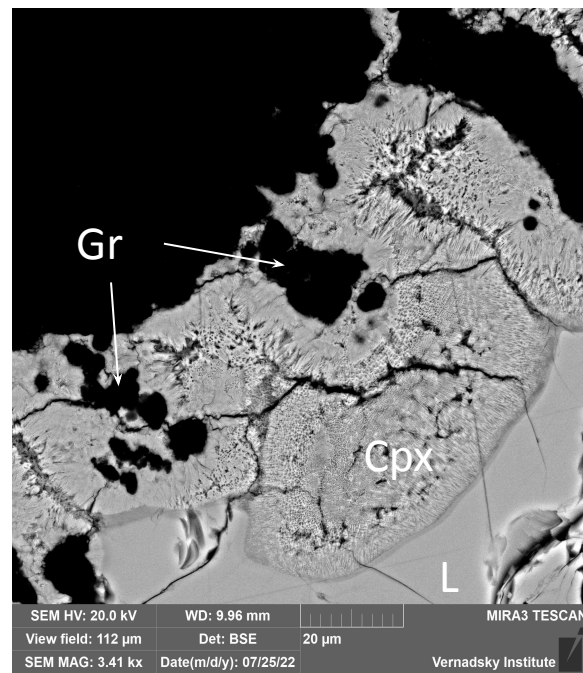
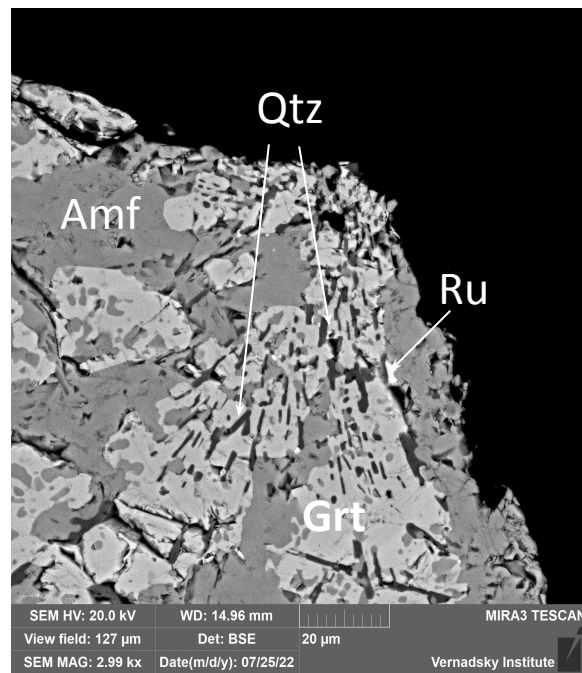
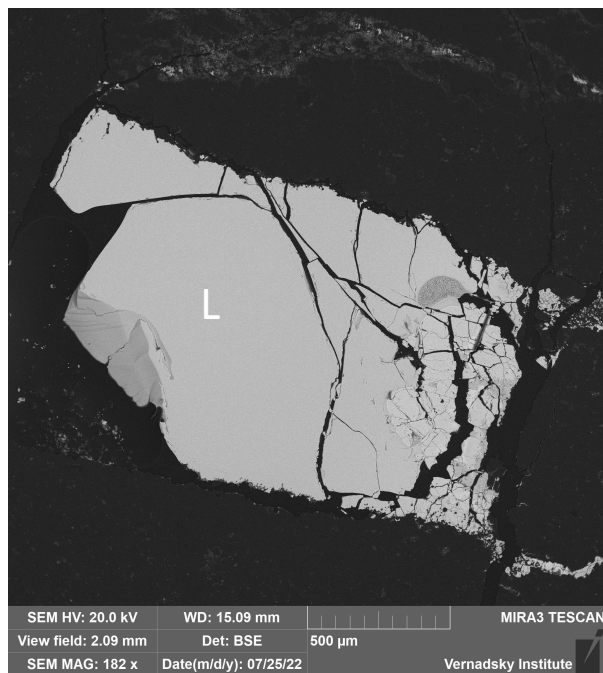
Эксперименты, проведенные при 1500°C и 3 ГПа



- 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°C 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 РТ 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

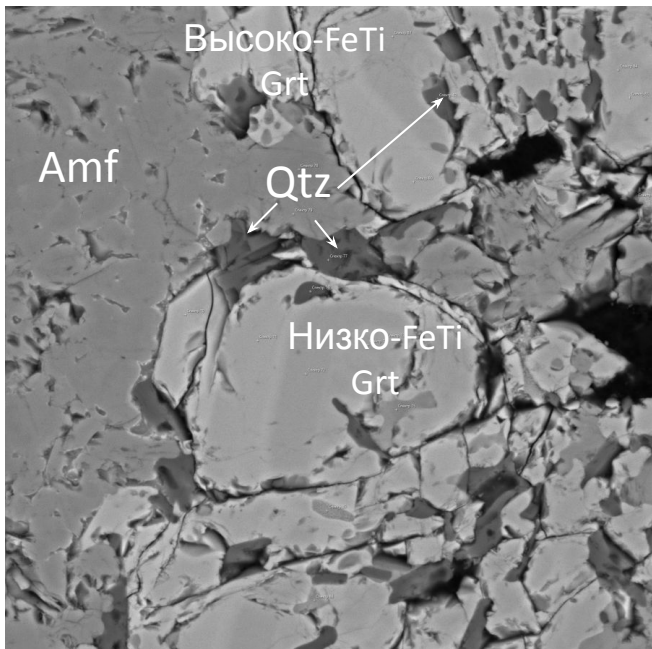
Средние составы стекол (L), измеренные в точке, полученные в эксперименте при $T = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 4\text{ ГПа}$.

| L в точке, мас. % | SiO₂ | Al₂O₃ | MgO | Na₂O | K₂O | FeO | TiO₂ | 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 $T = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 4\text{ ГПа}$.

| L по S, мас. % | SiO₂ | Al₂O₃ | MgO | Na₂O | K₂O | FeO | TiO₂ | 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 высоко железо-титанистые
- на низко железо-титанистые.
- 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 ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | 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 | |

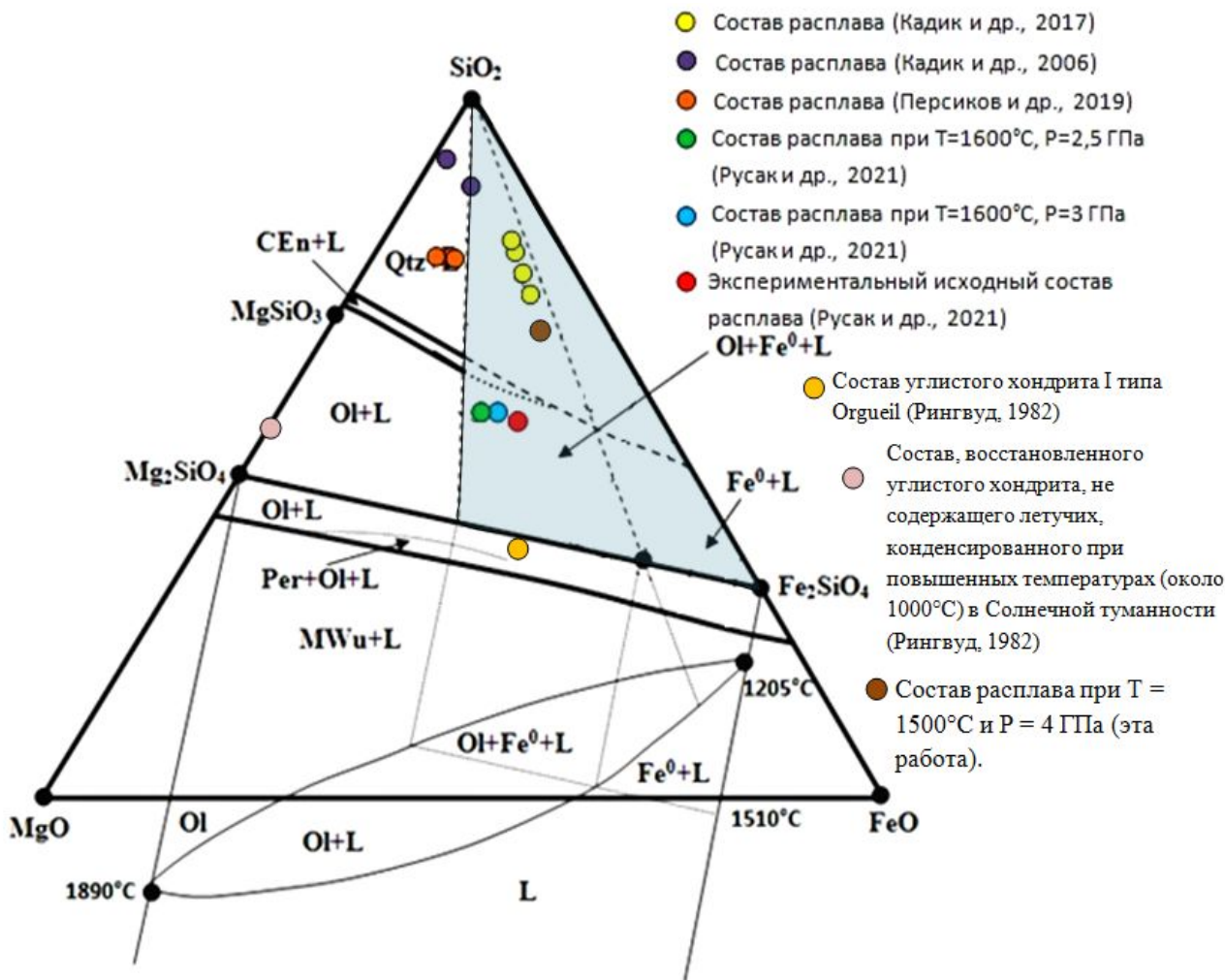
Средние составы высоко- Fe+Ti гранатов, измеренные в точке, полученные в эксперименте при T = 1500 °C и P = 4 ГПа.

| Высоко-Fe+Ti Grt | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ (мас. %), на которой показана область возможного выделения металлической фазы железа при восстановительных условиях



Составы расплавов: красный кружок – исходный состав системы $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$; голубой – $T = 1600^\circ\text{C}$, $P = 3$ ГПа; зеленый – $T = 1600^\circ\text{C}$, $P = 2,5$ 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 (Персигов 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 $T = 1500^\circ\text{C}$ 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 ($(\text{Mg,Fe})\text{O}$), CEn – клиноэнстатит (MgSiO_3), Ol – оливин (Mg_2SiO_4), Fe₂SiO₄ (фаялит), Fe⁰ – металлическое железо.

По тройной диаграмме $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ 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 (ССО буфер), потому что эта область находится выше буфера железо-вюстит (IW).
2. В экспериментах системы $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-C-H}$ получены стекла, содержащие оксид кальция, при $T = 1600^\circ\text{C}$ и $P = 2,5\text{-}3$ ГПа кристаллизуется фаза кальциевого пироксена по краям образца и графит, в виде вкрапленников, центральная зона представлена стеклом и кристаллами кварца (β -кварц), при $T = 1500^\circ\text{C}$ 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-SiC}$, 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 ($f\text{O}_2 < IW -1, -2$) 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 $IW + \text{H}_2\text{O}$, 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.

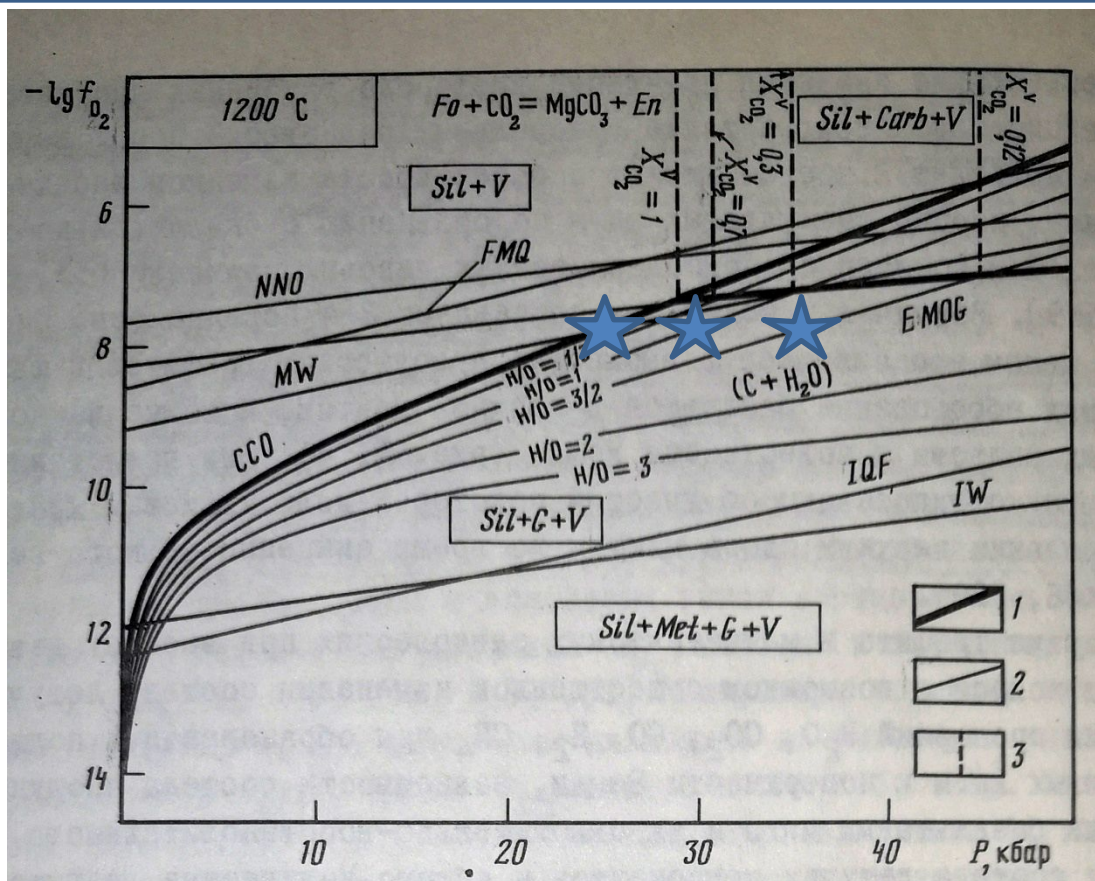
Публикации

- 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ в присутствии графита при высоких температурах и давлениях // Материалы ХХІХ 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$, 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$, 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ 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 С-О-Н летучих компонентов на дифференциацию мантийных магм (восстановительные условия) // ЛОМОНОСОВ - 2022. Сборник тезисов ХХІХ 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-C}$, 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-C}$, 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-C}$ 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 $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ и природного ферробазальта при высоких давлениях и температурах // Материалы ХХІІІ Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 2022 (в печати)

Спасибо за внимание!
Жду Ваши вопросы!



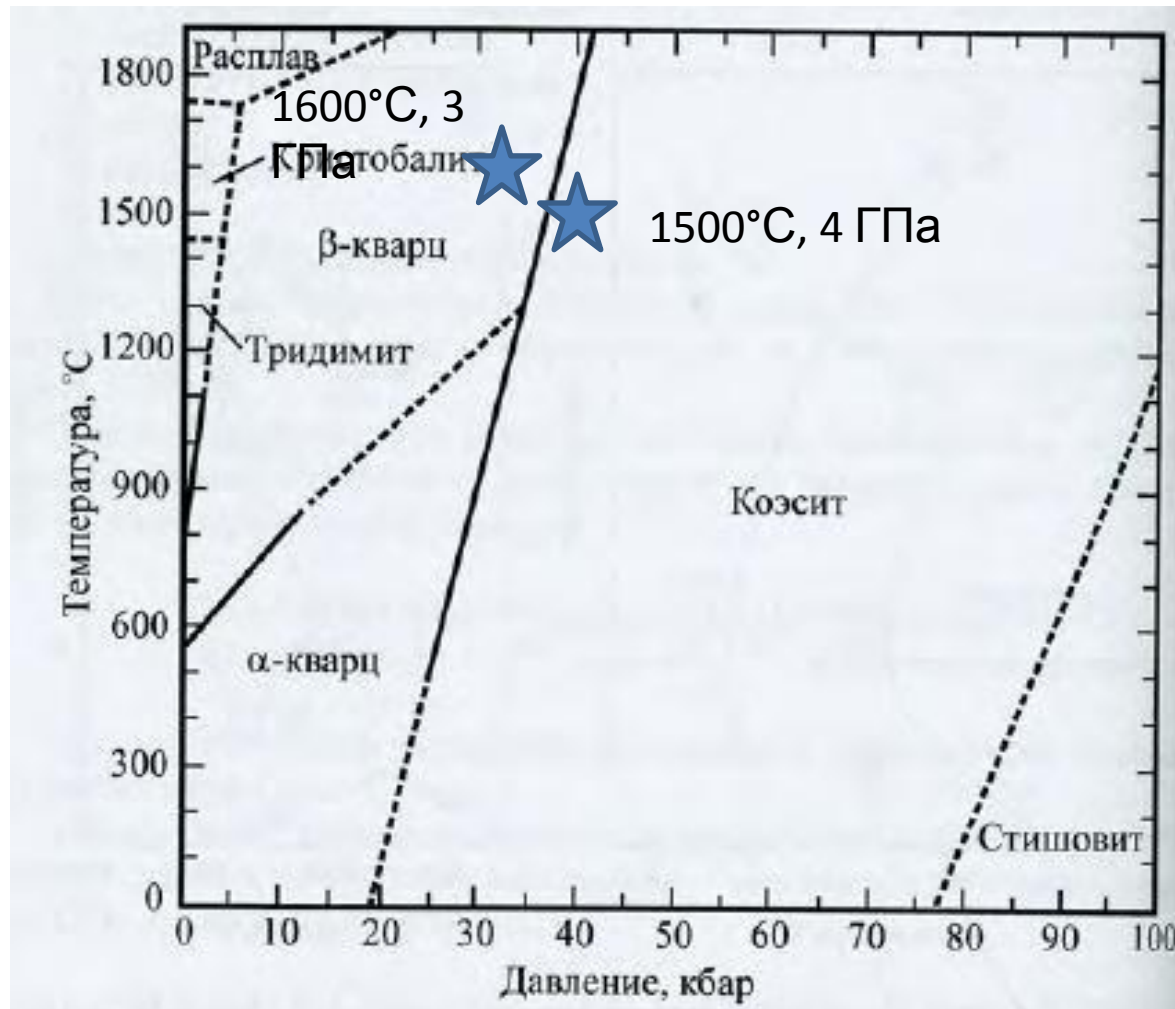
Кекертарсуак, Западная Гренландия, о.
Диско



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

- 1 – линия графитового буфера CCO, определяющая верхний по фугитивности кислорода предел стабильности магнезита;
- 2- f_{O_2} для различных буферных ассоциаций, в также для равновесия графит-флюидная фаза при фиксированных атомных отношениях НО;
- 3 – равновесие форстерит + $\text{CO}_2 = \text{магнезит} + \text{энстатит}$ при различной доле CO_2 ($X_{\text{CO}_2}^{\text{V}}$) во флюидной фазе; $\text{SiL}+\text{Carb}+\text{V}$, $\text{SiL}+\text{Carb}+\text{V}$, $\text{SiL}+\text{V}$ – 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