

# Экспериментальное изучение силикатных расплавов модельной системы $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ и природного ферробазальта при высоких давлениях и температурах.

*Русаков Александра Андреевна, м.н.с. лаборатории геохимии мантии Земли.*

**Введение.** В настоящее время вопрос об источнике и составе летучих компонентов ранней мантии Земли и составе ранней атмосферы остается актуальным. Согласно взглядам [1], углерод и водород были в силикатной мантии Земли во время всего процесса сегрегации железа в ядро. Углерод может присутствовать в растворенном состоянии в металлической фазе, в виде самостоятельной фазы графита или алмаза (на больших глубинах), а также в карбонатах. Водород находится в металлической фазе и в виде ОН-групп в силикатных минералах (амфиболах, водосодержащих фазах высокого давления). Присутствие летучих компонентов существенно влияет на РТ условия, состав образующихся мантийных магм (ранних продуктов плавления Земли) и их дифференциацию. Последний процесс играет ключевую роль в изменении состава газов в атмосфере во времени. В современных экспериментальных работах хорошо изучено влияние летучих на фазовые равновесия при кристаллизации и дифференциации магм в окислительной области при летучести кислорода «современной мантии» ( $f\text{O}_2 > \text{IW}$ ), но остаются мало изученными процессы дифференциации магм в восстановительных условиях с образованием металлической фазы ( $f\text{O}_2 < \text{IW}-1$ ), 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. Ставилась следующая **цель работы**: провести экспериментальное исследование и 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. В связи с поставленной целью решались следующие **задачи**: проведение экспериментов в системе  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-C-H}$  при  $T = 1500$  и  $1600^\circ\text{C}$  и  $P = 2,5\text{-}3,5$  ГПа и с природным ферробазальтом при  $T = 1500^\circ\text{C}$  и  $P = 4$  ГПа; построение трехкомпонентной диаграммы плавкости для системы  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ , на которой нужно отметить область возможного выделения металлической фазы железа при восстановительных условиях, а также указать составы, в которых равновесными фазами являлись составы мантийного расплава + (металлическая фаза железа).

**Методика.** Эксперименты проводились на твердофазовом аппарате типа «наковальня с лункой» с тороидным уплотнением НЛ-13Т в ГЕОХИ РАН. В качестве исходной смеси задавался упрощенный модельный валовый состав Земли ( $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$ ) по данным [2]. В качестве природного образца в эксперименте использовался ферробазальт № 11834 (Исландия), из коллекции В.И. Герасимовского, А.И. Полякова, предоставленный Н.С. Муравьевой. Эксперименты проводились в течение 40 минут (система  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-C-H}$ ) и в течение 1 часа (природный ферробазальт) с момента ввода системы в режим. Выбранная методика позволяет изучить фазовые отношения при разных  $T\text{-}P\text{-}f\text{O}_2$  параметрах для выбранных систем, и проследить кристаллизацию минералов из расплава.

**Результаты экспериментов и выводы.** Эксперименты, проведенные на установке «наковальня с лункой» в открытой системе без платиновых капсул, не позволяют получить отдельную металлическую фазу железа при буферировании системы углеродом, потому что эта область находится выше буфера железо-вюстит ( $\text{IW}$ ) [3]. 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 ( $\beta$ -кварц), при  $T = 1500^\circ\text{C}$  и  $P = 3$  ГПа структура стекла становится однородной и пористой с крупными вкрапленниками графита [4, 5]. В экспериментах с природным ферробазальтом кристаллизовались следующие фазы: закаленный расплав основного состава, гранат, амфибол, клинопироксен, рутил и кварц (коэзит). При температуре  $1500^\circ\text{C}$  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. Была построена ликвидусная поверхность тройной диаграммы плавкости для системы  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$  (рис. 1), на которой показана область возможного выделения металлических капель железа при восстановительных условиях. 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  $\text{Fe}^0$  [6]. Экспериментальный состав расплава, отвечающий природному ферробазальту, находится в равновесии с расплавом и кристаллами кварца. 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 в металлическую фазу. Полученные данные подтверждают результаты исследователей по влиянию летучести кислорода на выделение металлической фазы.

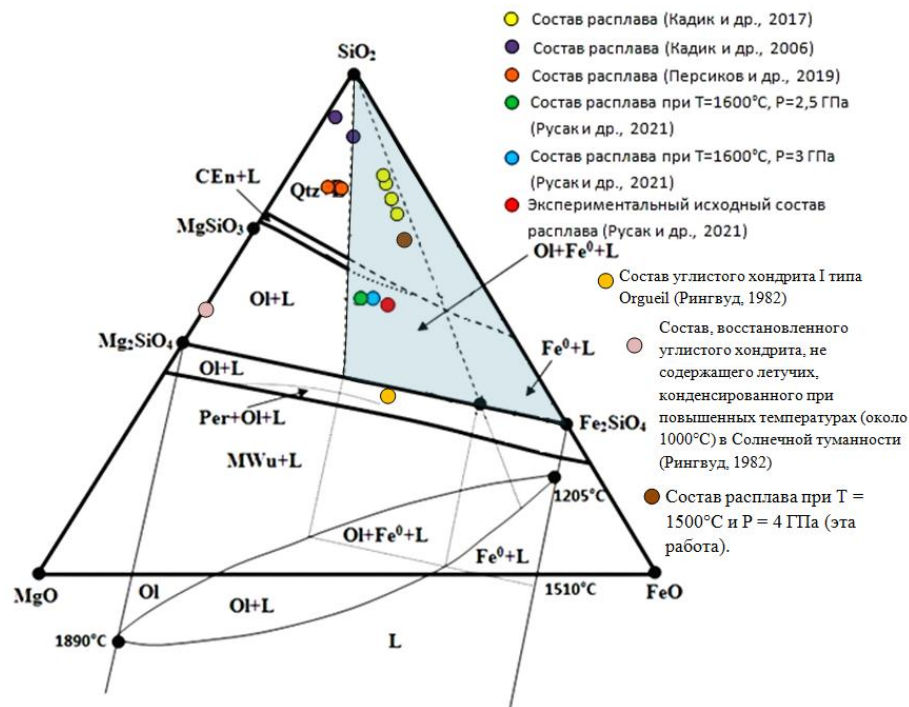


Рис. 1. Диаграмма плавкости для системы  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$  (мас. %), на которой показана область возможного выделения металлической фазы железа при восстановительных условиях (отмечена голубым цветом), выделенная по бинарной диаграмме форстерит-фаялит.

Условные обозначения: L – расплав, Qtz – кварц ( $\text{SiO}_2$ ), Per – периклаз ( $\text{MgO}$ ), Wu – вюстит ( $\text{FeO}$ ), MWu – магнизовюстит ( $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ ), CEn – клиноэнстатит ( $\text{MgSiO}_3$ ), Ol – оливин ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  (форстерит) –  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  (фаялит)),  $\text{Fe}^0$  – металлическое железо.

В природе существуют базальты, в которых находятся довольно крупные скопления железа, например, остров Диско в Западной Гренландии. Одной из возможных гипотез образования месторождения на о. Диско является взаимодействие платобазальтов с угленосной толщей, залегающей на метаморфитах, что является подтверждением влияния углерода на образование металлической фазы. Скопления самородного железа в виде сфер металла встречаются в базитах Североамериканской и Сибирской платформ [7, 8, 9], также самородки железа находили в базальтовом карьере в Бюле (Германия).

### Список литературы

1. Javoy M. The integral Enstatite Chondrite model of the Earth // *Geophys. Res. Lett.* 1995.V. 22. P. 2219-2222.
2. McDonough W.F. Earth's core. Springer International Publishing. AG (2017). W.M. White (ed.), *Encyclopedia of Geochemistry*, p. 1-13.
3. **Русаки А.А.**, Луканин О.А. Experimental study of silicate melts of basalt composition and the  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO-C}$  model system in equilibrium with a liquid iron alloy at high pressures // *Experiment in Geosciences*. — 2022. — Vol. 28, № 1. — P. 119–122.
4. **Русаки А.А.**, Луканин О.А., Кононкова Н.Н., Кургальцев А.А. 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*. — 2021. — Vol. 27, №1. — P. 98–101.
5. **Русаки А.А.**, Луканин О.А., Кургальцев 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 XXIX Всероссийской молодежной конференции Иркутск, 11–16 мая 2021 г (2021)*, Институт земной коры СО РАН, с. 223–225.
6. **Русаки 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 XXIII международной конференции Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*. — ИГЕМ РАН Москва, 2022. — С. 233–234.
7. Bird J.M., Goodrick C.A., Weathers M.S. Petrogenesis of Uivias iron, Disko Island, Greenland. *J. Geophys. Res.* 86 (12). 1981. PP. 11787-11806.
8. Левашов В.К., Округин Б.В. Оценка физических условий формирования сегрегаций самородного железа в базальтовом расплаве. *Геохимия и минералогия базитов и ультрабазитов Сибирской платформы*. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1984. С. 54-62.
9. Олейников Б.В., Округин А.В., Томшин М.Д. и др. Самородное металлообразование в платформенных базитах (под ред. В.В. Ковальского). Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1985. 124 с.