

# СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ И ГЕОДИНАМИКА



XXIX Всероссийская  
молодежная конференция



Институт земной коры СО РАН, Иркутск,  
11-16 мая 2021 г.

**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

# **СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ И ГЕОДИНАМИКА**

Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции  
Иркутск, 11–16 мая 2021 г.

**Ответственный редактор**  
чл.-корр. РАН Е.В. Складов

ИРКУТСК  
2021

**УДК 551.243**  
**ББК Д211.1 я431+Д38 я438+Д9(2Р2)21 я431**  
**С86**

**Строение литосферы и геодинамика:** Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 11–16 мая 2021 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – 306 с.

В сборнике представлены материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (11–16 мая 2021 г., Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск) и освещены вопросы общей геологии и тектоники, петрологии магматических и метаморфических комплексов, геохимии и рудообразования, эволюции осадочных бассейнов, современной геодинамики, неотектоники и геоморфологии, гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии, геофизических исследований и геоинформатики, добычи углеводородов и других полезных ископаемых.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, занимающихся исследованиями в различных областях наук о Земле.

**Председатель Оргкомитета**  
чл.-корр. РАН Е.В. Скляр

**Заместитель председателя Оргкомитета**  
к.г.-м.н. А.М. Дымшиц

**Ученый секретарь**  
А.А. Каримова

Проведение конференции и издание материалов осуществляются при организационной и финансовой поддержке Совета молодых ученых ИЗК СО РАН и гранта Министерства науки и высшего образования (по постановлению р220) № 075-15-2019-1883.

**Утверждено к печати Ученым советом ИЗК СО РАН**

ISBN 978–5–9908560–8–0

© Коллектив авторов, 2021  
© ИЗК СО РАН, 2021



## 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

*Русак А.А., Луканин О.А., Каргальцев А.А., Кононкова Н.Н.*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, [aleks7975@yandex.ru](mailto:aleks7975@yandex.ru); [lukanin@geokhi.ru](mailto:lukanin@geokhi.ru)

Проблемы, связанные с дифференциацией исходного планетного вещества в условиях ранней Земли при формировании магматического океана, последующей его кристаллизации, сопровождающейся выделением металлической обогащенной железом фазы, в настоящее время остаются предметом активного обсуждения [1]. Одним из путей их решения является экспериментальное изучение процессов плавления и кристаллизации модельных силикатных систем в широкой области РТ-параметров при различных окислительно-восстановительных условиях.

В данном сообщении приведены первые результаты экспериментального изучения плавления и кристаллизации в системе  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$  состава, близкого к среднему валовому составу силикатной Земли (Bulk Silicate Earth) [2], в присутствии графитовой фазы при высоких температурах и давлениях.

Была проведена серия экспериментов при  $T = 1600\text{ }^\circ\text{C}$  и  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  и  $P = 2.5\text{ ГПа}$ ; при  $T = 1600\text{ }^\circ\text{C}$  и  $P = 3$  и  $3.5\text{ ГПа}$ . Исходная смесь по содержанию главных петрогенных компонентов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{FeO}$  соответствовала Bulk Silicate Earth. Она готовилась из следующих реактивов: измельченного в порошок кварца, оксалата железа и оксида магния. Тщательно перемешанная смесь в виде порошка засыпалась в кварцевые ампулы и при  $T = 1505\text{ }^\circ\text{C}$  и  $P = 1\text{ атм}$  плавилась в высокотемпературной вертикальной трубчатой печи Nabertherm RHTV 1700 в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН). Отобранное чистое стекло перетиралось в яшмовой ступке до гомогенного состояния в атмосфере этилового спирта. Готовая смесь помещалась в графитовую капсулу, уплотнялась и закрывалась сверху графитовой крышкой и вставлялась в «тороид» из карбоната кальция, который служил средой, передающей давление. Эксперименты проводились в течение 40 мин на установке высокого давления НЛ-13Т с тороидальным уплотнением типа «наковальня с лункой» в ГЕОХИ РАН.

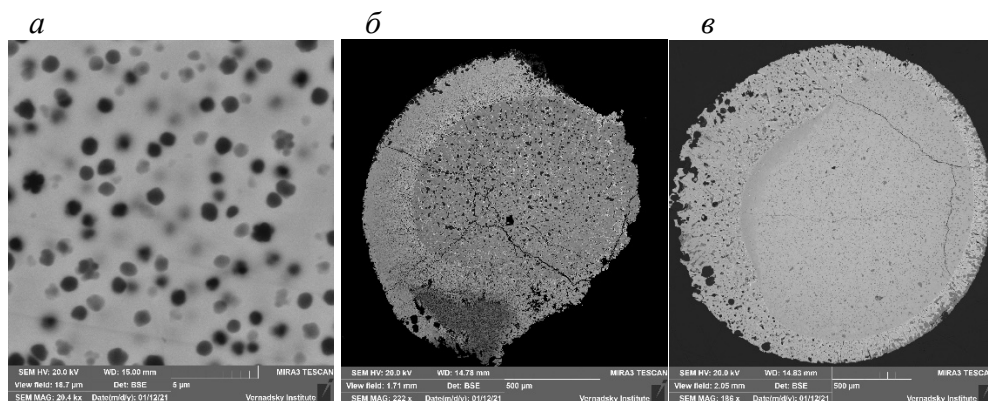
После вывода из режима продукты эксперимента закаливались путем выключения нагревателя. Внешний вид образца был черного цвета в виде небольшого цилиндра ( $1.5 \times 1.5\text{ мм}$ ), который повторял форму отверстия в графитовом нагревателе. Потом изготавливались шашки с образцами, полировались и изучались под микроскопом Olympus BX51. Образцы были обломочной формы, в виде закаленного светло-серого стекла с кавернами. Для определения химического состава стекло, полученное в трубчатой печи, и образцы после опытов при высоких давлениях изучались на микроанализаторе Camesa SX 100 с пятью волновыми спектрометрами и энерго-дисперсионной приставкой Bruker XFlash 6 в ГЕОХИ РАН. Использовались международные стандарты Смитсоновского института - Glass XF2, соответствующие стеклу основного состава. Растровые электронные изображения получены в отраженных электронах (BSE) с ускоряющим напряжением 15 кВ и током 30 нА. Также для изучения фазового и химического состава образцы изучались на



аналитическом сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan MIRA 3 в ГЕОХИ РАН. Растровые изображения в BSE получены при ускоряющем напряжении 20 кВ, рабочей дистанции – 15 кВ (0.8 нм) и при интенсивности пучка – 14 мА.

Полученные фазы в хорошо воспроизводимых опытах характеризовались структурно-текстурной и химической однородностью ( $T = 1600$  °С и  $P = 2.5$  и  $3$  ГПа), что говорит о достижении равновесия в проведенных опытах. Другие два эксперимента ( $T = 1500$  °С и  $P = 2.5$  ГПа;  $T = 1600$  °С и  $P = 3.5$  ГПа) не дали цилиндрической формы образцов, а распределились по графитовой ампуле и закристаллизовались в виде белого минерального агрегата.

В стекле основного состава, полученном при 1 атм, кристаллизуются мелкие закалочные фазы до 1 мкм (серого цвета в BSE на рисунке, *а*). Их состав близок к составу самого стекла. Истертое чистое стекло бралось за основу для экспериментов на установке «наковальня с лункой». Продукты экспериментов при  $T = 1600$  °С и  $P = 2.5$  ГПа представлены следующими фазами: стекло основного состава с кристаллами кварца до 10 мкм в центральной зоне и кальциевый минерал со стехиометрией пироксена с кристаллами кварца и округлыми выделениями графита в краевой зоне (рисунок, *б*). Средние значения и стандартные отклонения  $SiO_2$ ,  $MgO$  и  $FeO$  по чистому стеклу и по продуктам опыта 138 указаны в таблице. В экспериментах при  $T = 1600$  °С и  $P = 3$  ГПа фазовые отношения не изменились, но в центральной зоне практически нет таких крупных кристаллов кварца (рисунок, *в*). Кальциевый пироксен, по-видимому, мог образоваться в процессе диффузии между «тороидом», графитовым нагревателем и образцом. Средние составы центральной и краевой зон практически не отличаются от предыдущего опыта.



*а* – мелкие закалочные фазы в чистом стекле основного состава. Стекло серого цвета, закалочные фазы – черного и темно-серого цвета в BSE.  $T=1505$  °С,  $P = 1$  атм. *б* – обр. BSE1/2020 (оп.138).  $T_{эксп.}=1600$  °С,  $P = 2.5$  ГПа. Центральная зона – закаленное стекло основного состава с мелкими кристаллами кварца. Краевая зона – Ca-пироксен. Изображение в BSE. *в* – обр. BSE3/2020 (оп.159).  $T_{эксп.}=1600$  °С,  $P = 3$  ГПа. Закаленное стекло основного состава с мелкими кристаллами кварца. Краевая зона – Ca-пироксен. Изображение в BSE.



#### Химический состав стекол

№ оп.	Состав	SiO <sub>2</sub>	MgO	FeO	Сумма
Чистое 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	

Примечание. а – средние составы чистых стекол; б – средние составы кристаллических фаз в центральной зоне образца BSE1/2020 (оп,138), T<sub>эксп.</sub>=1600°C, P = 2,5 ГПа. Данные указаны в мас.%. Условные обозначения: X – средние значения, S – стандартные отклонения. Данные, указанные в скобках, обозначают количество анализов.

Данная система рассматривалась в присутствии графитовой фазы. Графит частично проник в краевую зону. Он встречается в виде округлых кристаллов до 50 мкм черного цвета в BSE. Так как мы работаем в открытой системе, оценить газовую фазу невозможно (будь это CO, CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>). Металлическая фаза отсутствует, летучесть кислорода, очевидно, контролировалась графитовым буфером. Данный результат является случаем кристаллизации в области нестабильности металлической фазы.

Проведенные первые эксперименты в системе SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO в присутствии графита и карбоната кальция показали, что при данных параметрах экспериментов обнаружено три фазы: стекло, кристаллы кварца до 10 мкм и кальциевый силикат по стехиометрии похожий на пироксен. Отличие состава чистого стекла от стекла в экспериментальных образцах состоит в уменьшении содержания оксида железа и увеличении оксида магния. Отсутствие металлического железа в расплаве означает, что в условиях проведения эксперимента летучесть кислорода была выше буфера железно-вюстит и, очевидно, контролировалась графитовым буфером (C-CO-CO<sub>2</sub>).

*Работа выполнена по государственному заданию № 0137-2019-0017. За предоставление образцов чистого стекла отдельная благодарность С.П. Крашенинникову Авторы благодарят Д.Д. Бадюкова за консультацию и помощь в работе на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA 3.*

#### Литература

1. Bouhifd M.A., Clesi V., Boujibar A. et al. Silicate melts during Earth's core formation // Chemical Geology. 2017. V. 461. P. 128–139.
2. McDonough W.F. Earth's core // Encyclopedia of Geochemistry / W.M. White (ed.), Springer International Publishing. 2017. P. 1–13.