

УДК 552.111

Я.О. Алферьева¹, А.С. Новикова²

СОСТАВ СИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА ФЛЮОРИТСОДЕРЖАЩИХ ОНГОНИТОВ ПРИ 700–800 °С, 100 МПа И РАЗНОЙ ФУГИТИВНОСТИ КИСЛОРОДА

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1*

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Проведены эксперименты по плавлению образцов флюоритсодержащих онгонитов из массива Ары-Булак при 700–800 °С, давлении 100 МПа и фугитивности кислорода, соответствующей буферам Ni–NiO и Mt–Нем. Во всех опытах достигнут предел содержания фтора в алюмосиликатном расплаве и насыщение по флюориту и топазу. Изменение фугитивности кислорода качественно не влияет на фазовые отношения в изученных образцах, но приводит к небольшому увеличению растворимости топаза и уменьшению растворимости флюорита в силикатном расплаве. В составе силикатного расплава происходит соответствующее изменение значения коэффициента агпайтности K_a и содержания CaO.

Ключевые слова: флюоритсодержащие онгониты, богатые кальцием онгониты, фугитивность кислорода.

Experiments on the melting of samples of fluorite-containing ongonites from the Ary-Bulak massif at 700–800 °C at a pressure of 100 MPa and oxygen fugacity corresponding to the Ni–NiO and Mt–Hem buffers were carried out. In all experiments, the limit of fluorine content in the aluminosilicate melt and saturation with respect to fluorite and topaz were reached. The change in oxygen fugacity does not qualitatively affect the phase relations in the studied samples, but leads to a slight increase in the solubility of topaz and a decrease in the solubility of fluorite in the silicate melt. In the composition of the silicate melt, there is a corresponding change in the value of the agpait coefficient K_a and the content of CaO.

Key words: fluorite-containing ongonites, calcium-rich ongonites, oxygen fugacity.

Введение. Флюоритсодержащие онгониты описаны [Коваленко, Коваленко, 1976, Антипов, 2009, Перетяжко, Савина, 2010] в качестве одной из разновидностей пород субвулканического массива Ары-Булак в Восточном Забайкалье. По химическому составу эти породы значительно отличаются по содержанию Ca от классических онгонитов месторождения Онгон-Хайерхан в Монголии. В то время как для классических онгонитов характерно чрезвычайно низкое (<0,5 масс.%) содержание CaO [Коваленко и др., 1971; Коваленко, Коваленко, 1976], в флюоритсодержащих онгонитах массива Ары-Булак количество CaO может достигать 10 масс.% и более.

По результатам изучения расплавных и флюидных включений во вкрацленниках этих пород авторы работы [Перетяжко, Савина, 2010] пришли к выводу, что в онгонитовой магме массива совместно с кристаллическими фазами и силикатным расплавом существовали водно-солевые флюиды и различные фторидные расплавы, которые были близки по составу к флюориту, селлитау, криолиту или хиолиту. В частности, в этой же работе детально описаны минеральные ассоциа-

ции, характеризующие существование в области субликивидуса системы двух несмесимых расплавов — силикатного и солевого Ca–F. Признаки существования Ca–F расплава описаны также для щелочных гранитов Монголии [Перетяжко и др., 2018] и гранитных редкометалльных пегматитов Канады [Vasyukova, Williams-Jones, 2014].

Формирование фторидных расплавов на магматической стадии становления массивов может влиять на распределение рудных компонентов и в итоге быть одним из решающих факторов при образовании месторождений [Граменицкий и др., 2005; Алферьева и др., 2019, 2020]. Были предприняты многочисленные попытки экспериментального моделирования равновесного существования кварц-нормативного силикатного и солевого Ca–F расплавов, однако несмесимость силикатного и преимущественно кальциевого фторидного расплава достоверно получена только в области высокой надликивидусной температуры [Сук и др., 2018]. Показано, что для флюоритсодержащих трахириолитов Монголии Ca–F солевой расплав существует с силикатным расплавом при 1250 °С. Скорее всего, в исследуемых нами

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии и вулканологии, ст. науч. с.; e-mail: YanaAlf@ya.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии и вулканологии, магистрант; e-mail: novikova-a-s@yandex.ru

образцах при температуре, превышающей температуру кристаллизации расплава флюоритового состава, также будет реализовано равновесие силикатный расплав—солевой Ca—F расплав. При более низкой температуре для похожих систем во всех без исключения экспериментальных работах получена устойчивая фазовая ассоциация силикатный расплав—флюорит [Граменицкий и др., 2005; Алферьева и др., 2018а; Price et al., 1999; Scaillet, Macdonald, 2004; Dolejš, Baker, 2004, 2006; Lukkari, Holtz, 2007].

С точки зрения общепризнанной модели высокофтористые гранитные расплавы образуются в качестве остаточных от кристаллизации обычных гранитов. Температура ликвидуса насыщенного водой гранитного расплава при $P=100$ МПа не больше 800 °C [Holtz et al., 2001]. Добавление в систему фтора приводит к значительному снижению его температуры кристаллизации [Коваленко, 1979; Manning, 1981; Holtz et al., 1993]. Согласно данным работы [Сырико и др., 2012], температура кристаллизации различных массивов онгонитов Забайкалья лежит в диапазоне 600–700 °C. Температура ликвидуса онгонитового расплава Ары-Булак соответствует 600–750 °C [Антипин и др., 2009; Перетяжко, Савина, 2010]. Исходя из этих данных существование в природе богатого фтором гранитного расплава при температуре 1250 °C, которая выше температуры ликвидуса обычного гранитного расплава, представляется невозможным. Одной из задач проведенной экспериментальной работы стала попытка получения Ca—F расплава при низкой температуре, отвечающей условиям субликвидуса гранитной системы.

Характерная черта, отличающая состав Ca—F расплава от флюорита, — значительное содержание в нем кислорода (4–10 масс.-%). Нами высказано предположение, что рост фугитивности O_2 в системе может привести к росту количества примеси кислорода в флюорите и, возможно, за счет роста примесей его трансформации в Ca—F расплав при температуре субликвидуса гранитной системы. Целью нашей работы стало определение возможного влияния фугитивности кислорода на фазовые отношения и состав фаз в системе, соответствующей флюоритсодержащему онгониту, при $T=700\pm800$ °C и давлении 100 МПа.

Материалы и методы экспериментальных исследований. В качестве исходных составов использованы природные образцы порфировых флюоритсодержащих онгонитов (№ АРБ-24) и афировых пород эндоконтактовой фации (№ АРБ-19) на юго-западном фланге массива Ары-Булак. (Все образцы для экспериментального изучения в виде порошков предоставлены И.С. Перетяжко.) Содержание главных компонентов в образцах пород представлено в табл. 1. Подробное петрографическое описание и полные данные химического состава образцов приведены в работах [Коваленко,

Коваленко, 1976; Перетяжко, Савина, 2010]. Данные о геологическом строении массива Ары-Булак содержатся в статье [Антипин и др., 2009].

Таблица 1

Химический состав исходных образцов пород массива Ары-Булак, по данным [Перетяжко и др., 2007], масс.-%

Образец	SiO ₂ *	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	F	Сумма
АРБ-24	62,60	14,20	3,15	4,04	9,26	6,80	97,28
АРБ-19	51,99	17,81	0,53	3,23	14,46	12,25	95,37

* Приведено содержание только главных компонентов. Более детальный химический состав этих образцов пород см. в работе [Перетяжко и др., 2007].

Порфировый флюоритсодержащий онгонит (образец № АРБ-24) на 20–30% состоит из порфировых вкрапленников, представленных кварцем, альбитом, санидином. В небольшом количестве присутствуют топаз и слюда циннвалльдитового ряда. Микрозернистая основная масса сложена этими же минералами и стеклом, отмечено присутствие флюорита (до 5%). Порода эндоконтактовой фации (образец № АРБ-19) имеет похожий минеральный состав и афировую структуру с редкими (до 1–2%) вкрапленниками в криптокристаллической основной массе. В этих двух разновидностях пород описаны [Перетяжко, Савина, 2010] многочисленные участки размером до нескольких миллиметров, состоящие из «F—Ca стекла» и кристаллов флюорита и диккита, их формирование связывают с жидкостной несмесимостью силикатного и солевого Ca—F расплавов.

Образцы пород были перетерты в яшмовых ступках. Полученный порошок загружали в платиновые ампулы. В каждую ампулу добавлено по 10 масс.% воды. После этого ампулы герметично заваривали. Длина полученных ампул составляла около 1,5 см, внешний диаметр 3 мм, толщина стенок 0,2 мм.

В первой серии экспериментов фугитивность кислорода задавали составом экзоклавного реактора, она соответствовала буферу Ni—NiO. Опыты проводили при 800 и 700 °C, давлении 100 МПа на гидротермальной установке высокого давления с внешним нагревом и холодным затвором на кафедре петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Продолжительность экспериментов при 800 °C составила 3 сут, при 700 °C — 7 сут. Точность поддержания температуры — 10 °C, давления — 10 МПа. Время закалки около 10 мин.

Во второй серии экспериментов с помощью буферной Mt—Нем смеси задавали условия повышенной фугитивности кислорода. Температурный режим и продолжительность опытов в этом случае ограничивались временем протекания реакции между компонентами буферной пары. Опыты проводили в Институте экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН (г. Черноголовка) на уста-

новке высокого газового давления УВГД10000 под руководством В.Ю. Чевычелова.

Буферную смесь составляли из магнетита и гематита, смешанных в отношении 1:9. Заваренные ампулы с измельченными образцами пород и необходимым количеством воды загружали в другую ампулу объемом около 0,8 см³. В эту ампулу добавляли буферную смесь и воду. Ампула также была заварена. Для увеличения времени работы буфера эта двойная ампула была помещена в еще одну внешнюю ампулу объемом около 1,9 см³, которую также заполняли буферной смесью и водой и заваривали. Каждый этап подготовки ампул сопровождался контролем массы образцов с точностью ±10⁻⁵ г.

Температура проведения второй серии экспериментов составила 750 °C, давление — 100 МПа, продолжительность — 2 сут. Время закалки около 20 мин.

По результатам анализа фазового состава буферной смеси на момент окончания опыта она на 100% состояла из магнетита во внешней ампуле, отношение Mt:Hem в средней ампуле составило ~4:1.

Определение химического состава образцов выполнено в лаборатории локальных методов исследования вещества на кафедре петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием энергодисперсионного микроанализатора на базе растрового электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV» (спектрометр INCA-Energy 350). Дисперсия, характеризующая порог обнаружения, для F составила 0,05 масс.%, для Na, K, Ca, Al, Si — 0,02 масс.%.

Точность определения равна ±10 отн.% при содержании до 1 масс.%; ±5 отн.% — при содержании от 1 до 5 масс.%; ±2 отн.% — при содержании от 5 до 10 масс.%.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В результате опытов получены образцы размером около 2×10 мм, которые состоят преимущественно из алюмосиликатного стекла и различных кристаллических фаз. Химический состав стекол по данным микрозондового анализа приведен в табл. 2 и 3. Солевой Ca—F расплав в изученных образцах не обнаружен. Изменение фугитивности кислорода, соответствующее буферам Ni—NiO и Mt—Hem не привело к качественному изменению фазовых отношений в системе.

Буфер Ni—NiO, T=800–700 °C. Порfirовый флюоритсодержащий онгонит при 800 °C (опыт № 24NN800) на 85% состоит из алюмосиликатного расплава. Кристаллические фазы представлены флюоритом (10%) и топазом (5%). Флюорит образует небольшие (до 10 мкм) изометричные, хорошо ограниченные или округлые кристаллы. Топаз представлен зернами размером от 2 до 10 мкм, имеющими удлиненные короткостолбчатые или изометричные очертания (рис. 1).

При понижении температуры до 700 °C (опыт № 24NN700) в образце появляется плагиоклаз (~3%), который представлен удлиненными субдиоморфными или скелетными кристаллами андезинового состава размером до 20 мкм. Размер кристаллов флюорита увеличился до 15–20 мкм. По результатам микрозондового анализа он имеет следующий состав (в ат. %): Ca 31,3; F 66,5; O 2; Si 0,2; Al 0,1; K 0,1.

Таблица 2

Химический состав стекол полученных экспериментальных образцов, масс.%

Номер опыта	Образец	Буфер	T, °C	Si	Al	Na	K	Ca	F	O*	Сумма
24NN800	АРБ-24	Ni—NiO	800	31,1±0,6**	7,99±0,11	2,37±0,15	3,54±0,17	1,2±0,6	2,3±0,15	50,8±0,8	99,6
24NN700	АРБ-24	Ni—NiO	700	32,4±1,6	7,3±0,7	1,2±0,4	3,5±0,4	1,1±0,4	1,5±0,6	51,8±2,1	99,1
24МН	АРБ-24	Mt—Hem	750	32,2±0,6	7,9±0,2	1,4±0,6	3,46±0,29	0,81±0,12	2,28±0,25	52,6±1,9	100,1
19NN800	АРБ-19	Ni—NiO	800	30,7±0,6	7,45±0,11	0,51±0,06	3,91±0,28	1,57±0,22	3,79±0,25	50±0,9	98,3
19NN700	АРБ-19	Ni—NiO	700	31,1±1,1	7,7±0,4	0,19±0,14	3,59±0,27	1,8±0,5	2,8±0,4	50,4±1,6	97,9
19МН	АРБ-19	Mt—Hem	750	31,7±0,8	7,31±0,22	0,16±0,04	3,39±0,28	1,03±0,24	3,03±0,08	53,2±1,1	99,8

* Кислород измерен; ** погрешность рассчитана с помощью коэффициента Стьюдента для малых выборок (5–8 анализов каждого образца стекла) для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Таблица 3

Химический состав стекол в пересчете на оксиды, масс.%

Номер опыта	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	F	O=2F	Сумма
24NN800	67,0	15,2	3,2	4,3	1,7	2,3	1,0	92,7
24NN700	70,0	13,9	1,6	4,3	1,6	1,5	0,6	92,3
24МН	68,3	14,8	1,8	4,1	1,1	2,3	0,9	91,4
19NN800	67,1	14,3	0,7	4,8	2,2	3,9	1,6	91,4
19NN700	68,0	14,8	0,3	4,4	2,6	2,9	1,2	91,8
19МН	67,7	13,8	0,2	4,1	1,4	3,0	1,3	89,0

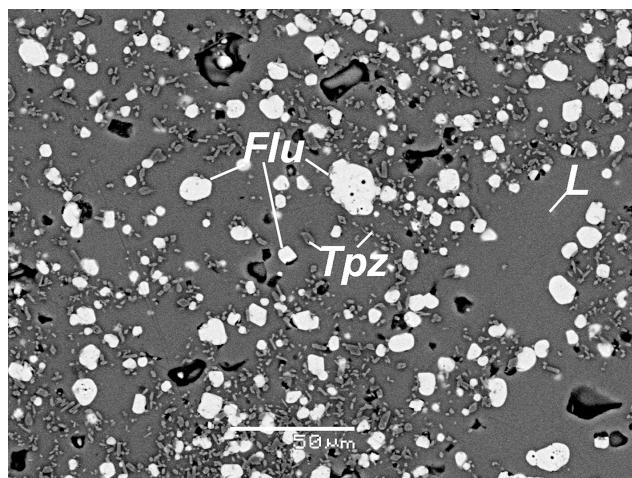


Рис. 1. Фазовые отношения в порфировом флюоритсодержащем онгоните при 800 °C в условиях буфера Ni–NiO (экспериментальный образец 24NN800)

В афировых породах при 800 °C (опыт № 19NN800) стабильные фазы представлены силикатным расплавом (55%) и примерно в равных количествах кварцем, топазом и флюоритом. Флюорит формирует изометричные ограненные или округлые зерна размером до 10 мкм. Топаз представлен мелкими (до 5 мкм) удлиненными короткостолбчатыми кристаллами, кварц — округлыми зернами неправильной формы размером до 50 мкм. Они часто содержат включения алюмосиликатного стекла или кристаллических фаз.

При понижении температуры до 700 °C (опыт № 19NN700) в образце также появляется плагиоклаз, состав которого соответствует битовниту. Он представлен удлиненными идиоморфными кристаллами размером до 10 мкм. Флюорит состоит из (ат.%) Ca (30,8), F (65,7), Si (0,4), Al (0,3), O (2,7). Топаз образует мелкие (до 5 мкм) зерна неправильной формы. Кварц представлен крупными (до 70 мкм) обособлениями неправильной округлой формы. Они часто содержат включения стекла, плагиоклаза, топаза. В химическом составе кварца характерно присутствие примесей (ат.%): Al 0,6; F 0,5; K и Ca по 0,1.

Буфер Mt–Нем, T=750 °C. Рост фугитивности кислорода в изученных образцах не приводит к качественному изменению фазовых равновесий. Как и в предыдущей серии опытов, при указанных параметрах (опыты № 24МН и № 19МН) в образцах основной объем занимает силикатное стекло — 85 и 55% соответственно (рис. 2). Кроме того, присутствуют флюорит (10 и 15%) и топаз (5 и 15%). В образце № 19МН образуется кварц. Флюорит обоих образцов состоит из (ат.%) Ca (31), F (65), Si (0,4), O (3,7), K и Na (по 0,1).

Полученные экспериментальные данные полностью согласуются с результатами предыдущих исследований фазовых отношений во фторсодержащих магматических системах [Граменицкий и др., 1993, 2005; Price et al., 1999; Scaillet, Macdonald,

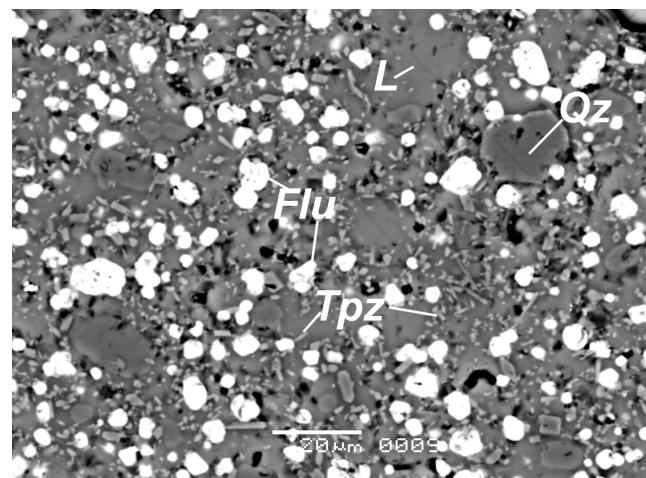


Рис. 2. Фазовые отношения в афировых породах эндоконтакта при 750 °C в условиях буфера Mt–Нем (экспериментальный образец № 19МН)

2004; Dolejš, Baker, 2004, 2006; Lukkari, Holtz, 2007; Алферьева и др., 2011, 2018а, б; Щекина и др., 2013]. Как в модельных системах, так и при плавлении природных образцов в субликовидусных условиях глубокодифференцированной гранитной системы не образуются несмесимые силикатный и солевой Ca–F расплавы.

Ca–F фаза во всех полученных образцах при параметрах эксперимента — стабильный равновесный кристаллический флюорит, а не солевой Ca–F расплав. Большинство зерен этой фазы в образцах имеет характерные кристаллические очертания с хорошо сформированными гранями и вершинами кристаллов. В некоторых случаях вершины кристаллов округлые, но, как правило, даже в этих случаях в зернах хорошо различимы грани или их следы. В зернах этой фазы не обнаружены характерные морфологические формы, характеризующие слияние капель или формирование слоя солевого расплава. Наоборот, между индивидами в случае их совместного роста образуются острые, прямые или тупые углы с хорошо выраженной вершиной. Среди зерен отсутствуют скелетные формы, которые могли бы свидетельствовать о кристаллизации флюорита из переохлажденного расплава в процессе закалки образцов. Химический состав округлых и ограненных разностей флюорита в пределах одного образца одинаковый. Соотношение Ca и F в зернах близко к стехиометрическому. Оно сохраняется постоянным и не зависит от состава существующего силикатного расплава.

Согласно полученным данным увеличение фугитивности кислорода способствует небольшому увеличению содержания примеси кислорода в флюорите: от 2–3 ат.% при буфере Ni–NiO и приблизительно до 4 ат.% при буфере Mt–Нем. Эта корреляция между содержанием кислорода в флюорите и величиной фугитивности кислорода требует дальнейшей более детальной проверки дру-

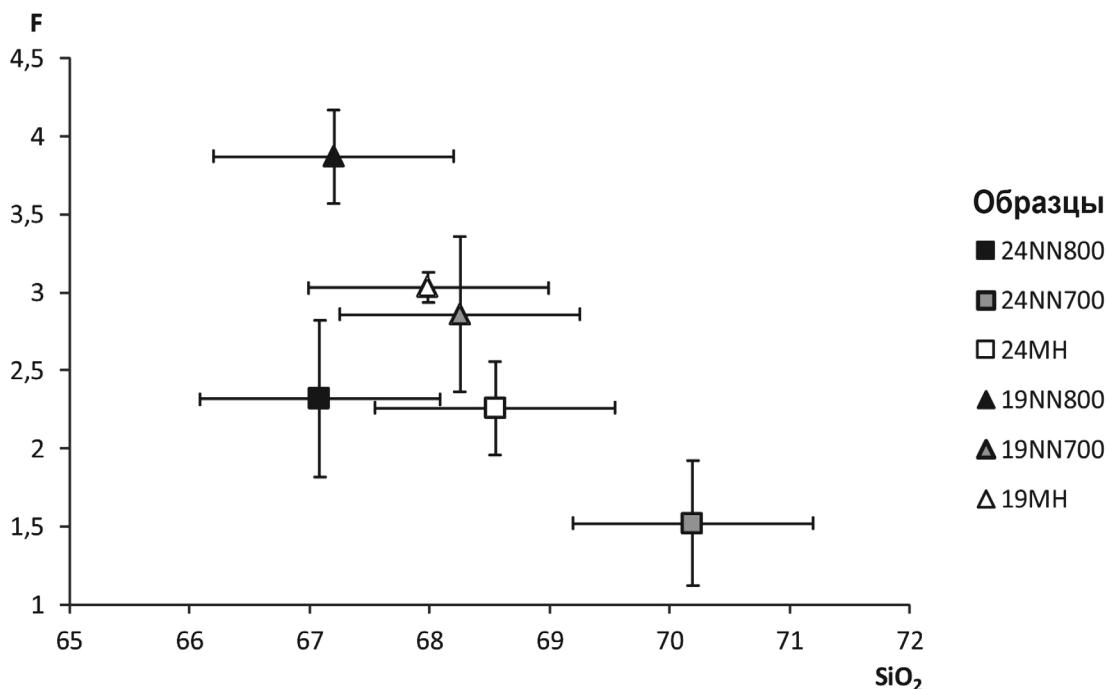


Рис. 3. Содержание SiO₂ и F в стеклах продуктов экспериментов, масс. %

гими аналитическими методами. Такое количество примесей не приводит к разрушению кристаллической структуры флюорита и расширению поля стабильности солевого Ca—F расплава в субликовидусную область гранитной системы.

Проведенные нами эксперименты моделируют равновесные фазовые отношения в изучаемых породах при заданных параметрах. Состав стекла образцов (за исключением содержания летучих компонентов) отражает состав силикатного расплава при параметрах эксперимента. Изменение состава стекла образцов с понижением температуры показывает направление изменения состава остаточного расплава в ходе кристаллизационной дифференциации этих пород.

На рис. 3 показаны тренды изменения содержания SiO₂ и F в стеклах образцов с понижением температуры. Поскольку ликвидусные минералы этих образцов представлены высокофтористыми флюоритом и топазом, то с понижением температуры от 800 до 700 °C их остаточный расплав обедняется фтором. Отсутствие высококремнистых минералов в образцах № 24NN800 и № 24MH приводит к значительному росту содержания кремнезема в расплаве образца № 24NN700 при 700 °C. Несмотря на образование кварца, в образцах № 19NN800, № 19MH и № 19NN700 также происходит повышение содержания кремнезема в остаточном расплаве при понижении температуры от 800 до 700 °C.

Полученная обратная пропорциональная зависимость между содержанием SiO₂ и F в остаточном расплаве находится в соответствии с данными [Коваленко, Коваленко, 1976; Коваленко, 1979; Manning, 1981]. Увеличение содержания фтора в

системе приводит к расширению поля стабильности кварца и соответствующему уменьшению содержания кремнезема в остаточном расплаве. Увеличение фугитивности кислорода практически никак не отражается на этой закономерности. Точки состава стекол, полученных в условиях буфера Mt—Нем, в пределах погрешностей попадают на тренды изменения содержания этих элементов в условиях буфера Ni—NiO.

Изменение фугитивности кислорода сказывается на величине коэффициента агпантности силикатных стекол. На рис. 4 показано, что состав силикатного стекла, полученного в опыте № 24MH в условиях буфера Mt—Нем и с учетом значений абсолютной погрешности измерений более плумазитовый, чем стекол, полученных в образцах № 24NN800 и № 24NN700 в условиях буфера Ni—NiO. Единственная кристаллическая фаза, которая влияет на коэффициент агпантности расплава в экспериментальных образцах № 24NN800, № 24NN700 и № 24MH, — топаз. Поэтому уменьшение коэффициента агпантности и рост содержания Al₂O₃ в силикатном расплаве в этом случае, скорее всего, обусловлены увеличением растворимости в нем топаза. В экспериментальных образцах на основе породы эндоконтактовой фации (образец № АРБ-19) этот эффект с учетом погрешностей измерений почти не проявлен.

В стеклах экспериментов с повышенной фугитивностью кислорода отмечается пониженное содержание CaO. На рис. 5 показано, что составы этих стекол лежат значительно ниже трендов, полученных для систем с фугитивностью, соответствующей буферу Ni—NiO. Единственная Ca-содержащая фаза этих образцов (кроме

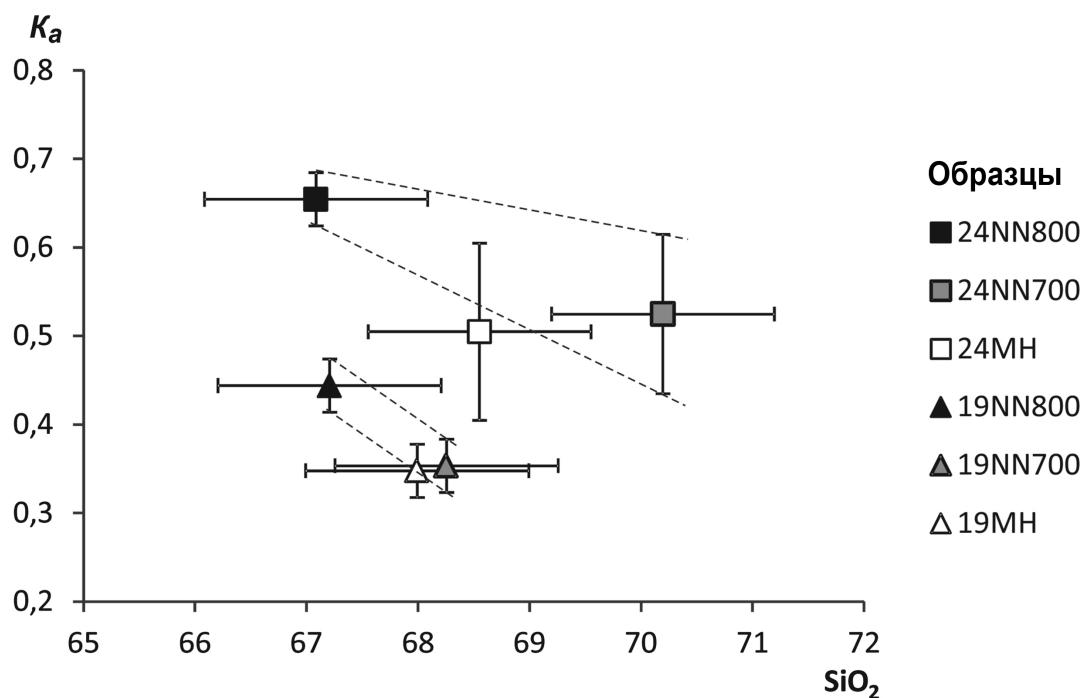


Рис. 4. Значения коэффициента агпантности $K_a = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ (в мольных долях) и содержание SiO_2 (масс.%) в стеклах экспериментальных образцов

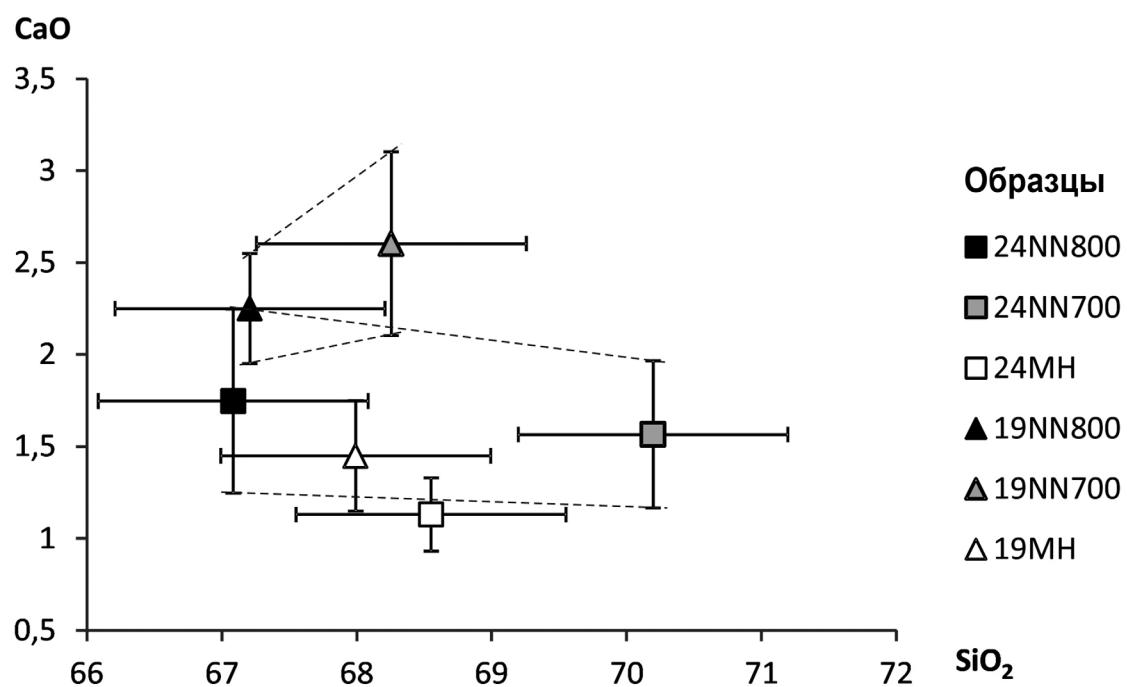


Рис. 5. Содержание SiO_2 и CaO в стеклах продуктов экспериментов, масс.%

силикатного расплава) — флюорит. Поэтому, по-видимому, уменьшение содержания кальция в расплаве свидетельствует об уменьшении растворимости в нем флюорита. Этот эффект более ярко выражен для экспериментальных образцов на основе породы образца № АРБ-19, чем образца № АРБ-24.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что состав силикатного

расплава и растворимость в нем богатых фтором фаз могут существенно меняться в зависимости от величины фугитивности кислорода. В основе этого эффекта, скорее всего, лежит принцип кислотно-основного взаимодействия компонентов системы. Рост фугитивности кислорода может приводить к перераспределению катионов между фтором и кислородом и вследствие этого способствовать изменению полей стабильности различных фаз.

В природных системах изменение режима летучих может стать причиной частичного растворения уже сформированных высокофтористых минералов или, наоборот, начала кристаллизации новых.

Заключение. Во всех проведенных экспериментах достигнуты максимальный предел содержания фтора в силикатном расплаве данного состава и насыщение этого расплава по флюориту и топазу.

Признаков силикатно-фторидной жидкостной несмесимости в продуктах экспериментов не обнаружено. Изменение летучести кислорода в рамках буферов Ni–NiO и Mt–Нем в исследованных образцах не приводит к образованию Ca–F расплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алферьева Я.О., Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И. Экспериментальное изучение фазовых отношений в литийсодержащей богатой фтором гаплогранитной и нефелин-сиенитовой системе // Геохимия. 2011. № 7. С. 713–728.
- Алферьева Я.О., Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И. Изменение отношения Ta/Nb в последовательных дифференциатах гранитного расплава (расчеты на основе экспериментальных данных) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 1. С. 34–46.
- Алферьева Я.О., Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г. Вариации содержания Та и Nb в плюмазитовом гаплогранитном высокофтористом расплаве в связи с изменением ассоциации ликвидусных фаз // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 3. С. 61–68.
- Алферьева Я.О., Новикова А.С., Дмитриева А.С. Экспериментальное изучение фазовых отношений при кристаллизации онгонитового расплава массива Ары-Булак // Тр. Всеросс. ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. М.: ГЕОХИ РАН, 2018а. С. 93–97.
- Алферьева Я.О., Щекина Т.И., Граменицкий Е.Н. Предельное содержание фтора и воды в гранитных высокоеvolutionированных расплавах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018б. № 3. С. 70–76.
- Антипин В.С., Андреева И.А., Коваленко В.И., Кузнецов. В.А. Геохимические особенности онгонитов Ары-Булакского массива // Петрология. 2009. Т. 17, № 6. С. 601–612.
- Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И. Фазовые отношения в ликвидусной части гранитной системы с фтором // Геохимия. 1993. № 6. С. 821–840.
- Граменицкий Е.Н., Щекина Т.И., Девятова В.Н. Фазовые отношения во фторсодержащих гранитной и нефелин-сиенитовой системах и распределение элементов между фазами. М.: ГЕОС, 2005. 186 с.
- Коваленко Н.И. Экспериментальное исследование образования редкометалльных литий-фтористых гранитов. М.: Наука, 1979. 85 с.
- Коваленко В.И., Коваленко Н.И. Онгониты — субвулканические аналоги редкометалльных литий-фтористых гранитов. М.: Наука, 1976. 125 с.
- Коваленко В.И., Коваленко Н.И., Антипин В.С., Петров Л.Л. Топазсодержащий кварцевый кератофор (онгонит) — новая разновидность субвулканических жильных
- Рост фугитивности кислорода способствует небольшому увеличению содержания алюминия и уменьшению содержания кальция в силикатном расплаве. Такие вариации состава кварцнормативного фторсодержащего расплава, скорее всего, становятся возможны за счет изменения растворимости в нем топаза и флюорита.
- Финансирование.** Аналитические данные получены в лаборатории локальных методов исследования вещества (кафедра петрологии и вулканологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова) с использованием электронно-зондового микронализатора «JEOL JXA-8230», приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.
- магматических пород // Докл. АН СССР. 1971. Т. 199, № 2. С. 430–433.
- Перетяжко И.С., Загорский В.Е., Царева Е.А., Сапожников А.Н. Несмесимость фторидно-кальциевого и алюмосиликатного расплавов в онгонитах массива Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Докл. РАН. 2007. Т. 413, № 2. С. 244–250.
- Перетяжко И.С., Савина Е.А. Флюидно-магматические процессы при образовании пород массива онгонитов Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 10. С. 1423–1442.
- Перетяжко И.С., Савина Е.А., Карманов Н.С., Дмитриева А.С. Несмесимость фторидно-кальциевого и силикатного расплавов в трахириолитовой магме: данные изучения кислых вулканитов Нилгинской депрессии в Центральной Монголии // Петрология. 2018. Т. 26, № 4. С. 400–425.
- Сук Н.И., Котельников А.Р., Перетяжко И.С., Савина Е.А. Эволюция расплава трахириолитов по экспериментальным данным // Тр. Всеросс. ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. М.: ГЕОХИ РАН, 2018. С. 129–132.
- Сырицо Л.Ф., Баданина Е.В., Абушкевич В.С. и др. Вулканоплутонические ассоциации кислых пород в пределах редкометалльных рудных узлов Забайкалья: геохимия пород и расплавов, возраст, Р-Т условия кристаллизации // Петрология. 2012. Т. 20, № 6. С. 622–648.
- Щекина Т.И., Граменицкий Е.Н., Алферьева Я.О. Лейкократовые магматические расплавы с предельными концентрациями фтора: эксперимент и природные отношения // Петрология. 2013. Т. 21, № 5. С. 499–516.
- Dolejš D., Baker D.R. Thermodynamic analysis of the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{F}_2\text{O}^{-1}$: stability of fluorine-bearing minerals in felsic igneous suites // Contrib. Miner. Petrol. 2004. Vol. 146. P. 762–778.
- Dolejš D., Baker D.R. Fluorite solubility in hydrous haplogranitic melts at 100 MPa // Chem. Geol. 2006. Vol. 225. P. 40–60.
- Holtz F., Dingwell D.B., Behrens H. Effects of F, B_2O_3 and P_2O_5 on the solubility of water in haplogranite melts compared to natural silicate melts // Contrib. Miner. Petrol. 1993. Vol. 113, N 4. P. 492–501.
- Holtz F., Johannes W., Tamic N., Behrens H. Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in

- the crust: a reevaluation and implications // *Lithos*. 2001. Vol. 56, N 1. P. 1–14.
- Lukkari S., Holtz F.* Phase relations of F-enriched peraluminous granite: an experimental study of the Kymi topaz granite stock, southern Finland // *Contrib. Miner. Petrol.* 2007. Vol. 153. P. 273–288.
- Manning D.A.C.* The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz–Ab–Or with excess water at 1 kb // *Contrib. Miner. Petrol.* 1981. Vol. 76. P. 206–215.
- Price J.D., Hogan J.P., Gilbert M.C. et al.* Experimental study of titanite-fluorite equilibria in the A-type Mount Scott granite: implications for assessing F contents of felsic magma // *Geology*. 1999. Vol. 27. P. 951–954.
- Scaillet B., Macdonald R.* Fluorite stability in silicic magmas // *Contrib. Miner. Petrol.* 2004. Vol 147. P. 319–329.
- Vasyukova O., Williams-Jones A.E.* Fluoride-silicate melt immiscibility and its role in REE ore formation: Evidence from the Strange Lake rare metal deposit, Quebec-Labrador, Canada // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2014. Vol. 139. P. 110–130.

Поступила в редакцию 28.10.2020

Поступила с доработки 28.01.2021

Принята к публикации 28.01.2021