

УДК 548.4

СИЛИКАТНАЯ ЖИДКОСТНАЯ НЕСМЕСИМОСТЬ КАК РЕЗУЛЬТАТ ФЕННЕРОВСКОГО ТИПА ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ТОЛЕИТОВЫХ МАГМ ВУЛКАНА ВАН-ТЯНЬ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ КИТАЙ)

© 2020 г. О. А. Андреева^а, *, И. А. Андреева^а, В. В. Ярмолук^а,
Ji Jianqing^б, Zhou Xin^б, С. Е. Борисовский^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

^бSchool of Earth and Space Sciences, Peking University, Peking, China

*e-mail: oandreeva@igem.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

После доработки 22.12.2019 г.

Принята к публикации 29.12.2019 г.

Результаты изучения включений минералообразующих сред легли в основу реконструкции эволюции толеитовых расплавов, участвовавших в формировании пород щитовой постройки вулкана Ван-Тянь (Северо-Восточный Китай). Оценены физико-химические условия кристаллизации этих расплавов. Установлены первичные расплавные включения в плагиоклазе базальтов. Они содержат “сухое” железистое стекло или раскристаллизованный тонкозернистый минеральный агрегат, полевошпатовую кайму, а также глобулы различного состава – водосодержащие железистые глобулы, водосодержащие кислые глобулы и “сухие” глобулы кислого стекла. В основной массе толеитовых базальтов выявлены “сухие” кислые и железистые глобулы, а также гидратированное железистое стекло с содержанием H₂O до 10–15 мас. %. Для расчета пути фракционной кристаллизации толеитовых расплавов вулкана Ван-Тянь проведено численное моделирование в программе КОМАГ-МАТ-5.2.2 с использованием составов стекол гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе базальтов. Показано, что расчетные температуры начала кристаллизации плагиоклаза согласуются с температурами, полученными в ходе термометрических экспериментов с включениями в плагиоклазе этих пород, и соответствуют 1180–1200°C. На основании проведенных исследований выделено несколько этапов дифференциации вещества при формировании пород вулкана. К первому этапу относится фракционирование расплава по феннеровскому типу, которое обусловлено появлением на ликвидусе плагиоклаза в начале кристаллизации магм. Расслоение ферробазальтового расплава на кислую и железистую силикатные несмешивающиеся жидкости (как “сухие”, так и гидратированные) отвечает второму этапу дифференциации толеитовых расплавов. О процессе силикатной жидкостной несмесимости свидетельствует присутствие в интерстициальном пространстве изученных базальтов, а также в расплавных включениях в плагиоклазе этих пород контрастных по составу силикатных стекол.

Ключевые слова: внутриплитный магматизм, расплавные включения, эволюция толеитовых магм, феннеровский тип кристаллизационной дифференциации, силикатная несмесимость

DOI: 10.31857/S0869590320040020

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о расслоении ферробазальтовых расплавов на две контрастные силикатные жидкости – кислую и железистую – на протяжении многих десятков лет остается одним из самых дискуссионных в петрологии. В первую очередь, это связано с тем, что проявление силикатной несмесимости может приводить к образованию “разрыва Дэли” в бимодальных магматических ассоциациях. Локальное формирование контрастных по составу силикатных стекол, связанное с ликвационными процессами в системе кварц–фаялит–лейцит, было

установлено для Сибирской трапповой провинции (Рябов, 1989; Kamenetsky, 2013), вулкана Эль Лако в Чили (Velasco et al., 2016), интрузива Септ Иль в Канаде (Higgins, 2005; Charlier et al., 2011), крупной изверженной провинции Донгаргар в Индии (Sensarma, Palme, 2013) и др. Рядом исследователей ликвационный механизм дифференциации магм в качестве интерпретации бимодального распределения составов был предложен для таких интрузивных тел, как Скаергард в Гренландии (Veksler et al., 2007; Holness et al., 2011). Однако вероятность существования силикатной не-

смесимости в больших объемах, приводящей к образованию бимодальных вулканических серий пород, представляется спорной. Поэтому высказываются и другие точки зрения на происхождение железистой и кислой жидкостей при эволюции расплавов в толеитовых системах. Так, высокое содержание оксида железа в ферробазальтах объясняется кристаллизацией расплава по феннеровскому пути его дифференциации (Уэйджер, Браун, 1970; McBirney, Nakamura, 1974; Brooks, Nielsen, 1978; McBirney, Naslund, 1990; Morse, 1981). Образование кислых пород в процессе эволюции толеитовых магм связывается, главным образом, с переходом от феннеровского к боуэновскому тренду кристаллизационной дифференциации (Kuno, 1965; Carmichael, 1964; Луканин, 1985; Sisson et al., 2005). Различие в направлении трендов кристаллизации расплавов обуславливается в основном окислительно-восстановительным режимом (Osborn, 1959), контролирующим выделение магнетита. Вследствие этого, внутрикамерная дифференциация в закрытых условиях существенно отличается от фракционирования толеитовых магм в открытой по кислороду системе (Presnall, 1966; Eggler, Osborn, 1982; Бабанский и др., 1983; Лапин и др., 1985; Кадик и др., 1986, 1990; Snyder et al., 1993; Toplis, Carroll, 1995). Поэтому конечными продуктами дифференциации толеитовых магм в открытой по кислороду системе служат щелочные риолиты (Carmichael, 1964; Ghiorso, Carmichael, 1987), а не ферроандезиты. Однако все перечисленные механизмы кристаллизационной дифференциации не исключают влияния силикатной несмесимости на образование “разрыва Дэли” при формировании комплексов магматических пород (Charlier et al., 2011).

Другой вопрос, вызывающий многочисленные дебаты, связан с геохимическим аспектом проявления силикатной несмесимости – распределением элементов между кислым и железистым расплавами. Существует представление, что в связи с устойчивой миграцией P_2O_5 в железистую жидкость концентрации этого компонента в ней могут достигать более 10 мас. %. Соответственно, была выдвинута гипотеза о магматическом генезисе магнетит-апатитовых руд и месторождений Кируна-типа (Philpotts, 1981, 1982; Kolker, 1982; Duchesne, 1999; Hou et al., 2018).

В статье представлены результаты изучения расплавных включений в плагиоклазе толеитовых базальтов вулкана Ван-Тянь Чанбайшаньского ареала (Северо-Восточный Китай). Среди них было выделено несколько типов включений, отличающихся по составу. Показано, что их образование может быть результатом жидкостной не-

смесимости, возникающей при феннеровском типе дифференциации магм.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВУЛКАНА ВАН-ТЯНЬ И ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Чанбайшаньский вулканический ареал (рис. 1), охватывающий территорию площадью свыше 15000 км² (Сахно, 2008; Liu et al., 2015), располагается в северной краевой части архейско-протерозойского Сино-Корейского кратона в зоне пересечения рифтовой системы Тяньлу северо-восточного простирания с Пэктусанской системой разломов северо-западного направления (Сахно, 2008; Андреева, 2014). В пределах ареала на территории Китая выделяются два крупнейших вулкана – Чанбайшань Тяньчи и Ван-Тянь. В отличие от глубоко дифференцированной серии щелочных пород вулкана Чанбайшань Тяньчи (Fan et al., 1998, 2007; Сахно, 2008; Андреева и др., 2014, 2016, 2018), лавы вулкана Ван-Тянь по составу слабо варьируют от базальтов до андезибазальтов и относятся преимущественно к толеитовой серии, и реже – к щелочной. Мощная щитовая платформа и отчасти конус вулкана сложены толеитовыми базальтами. Щелочные базальтоиды встречаются значительно реже, главным образом, в строении вулканического конуса, где слагают отдельные потоки. Кислые породы участвуют в строении вулкана и представлены трахитами неков и щелочными риолитами экстррузивного купола.

Согласно результатам К-Аг датирования (Fan et al., 1999), формирование вулкана охватывает достаточно короткий геологический промежуток времени. Были установлены три этапа активности вулкана Ван-Тянь: 1) излияния базальтовых лав щитовой постройки Чанбай, завершившиеся 2.87 млн лет назад; 2) этап становления конуса Ван-Тянь, отвечающий извержениям, главным образом, базальтов, трахибазальтов, трахиандезибазальтов и трахиандезитов (2.69–2.41 млн лет); 3) этап, ознаменовавшийся формированием экстррузивного купола Хонгтоушань щелочно-риолитового состава (2.12 млн лет).

Во время полевых работ в Северо-Восточном Китае нами были опробованы разрезы северного, южного и восточного склонов конуса вулкана Ван-Тянь, а также его щитовая постройка. На классификационной диаграмме $SiO_2-(Na_2O + K_2O)$ (рис. 2) породы вулкана Ван-Тянь отвечают по составу базальтам, трахибазальтам, трахиандезитам и трахитам. Доминирующая группа пород вулкана Ван-Тянь представлена базальтами, которыми сложены как щитовая платформа, так и основная часть

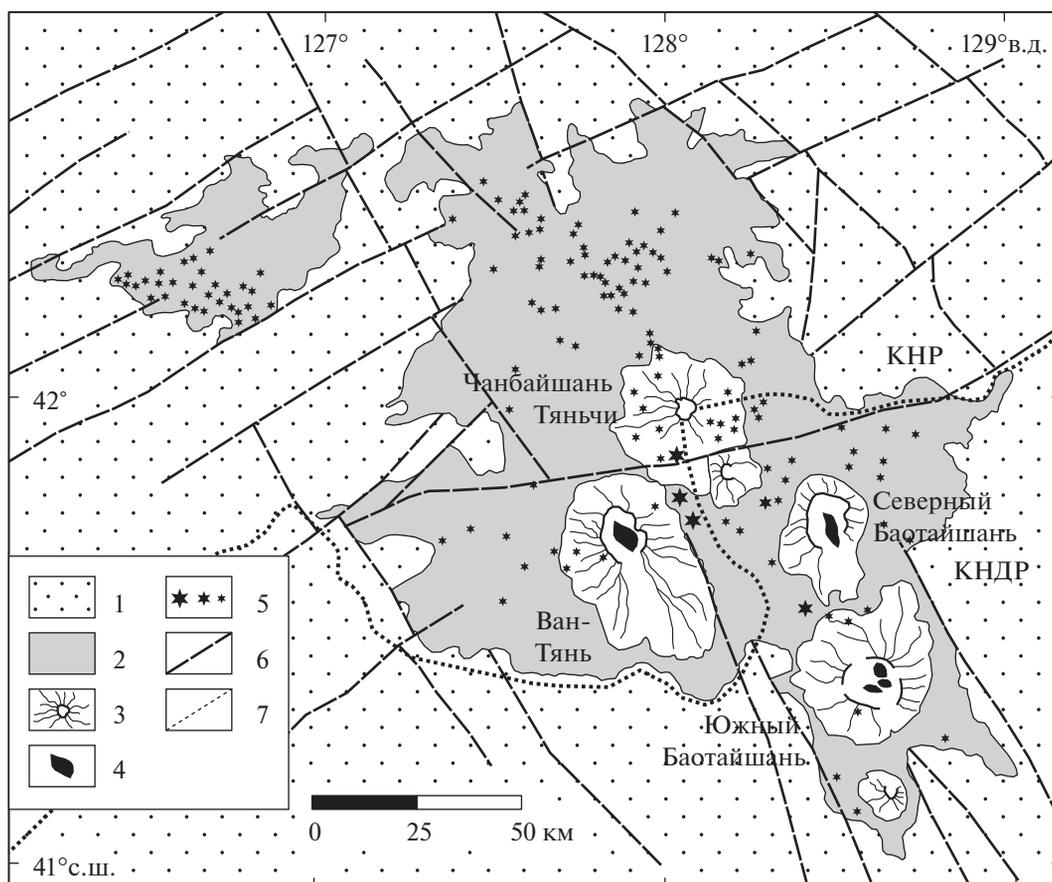


Рис. 1. Карта вулканического ареала Чанбайшань (Андреева и др., 2018). 1 – вмещающие породы; 2 – вулканический комплекс щитовой стадии (миоцен–ранний плейстоцен); 3 – стратовулканы кальдерной стадии плиоцен-голоценового возраста; 4 – экструзии в кальдерах; 5 – небольшие вулканические конусы, диатремы, купола; 6 – разломы; 7 – государственная граница.

конуса вулкана. Базальты представляют собой высокожелезистые (9.6–14.9 мас. % Fe_2O_3), высокотитанистые (2.4–3.3 мас. % TiO_2), низкомагнезиальные (2.7–4.3 мас. % MgO) породы с высокой концентрацией P_2O_5 , достигающей 0.7 мас. %, при содержании SiO_2 от 48.7 до 49.2 мас. %. Содержание суммы щелочей в них варьируют от 4.3 до 5.2 мас. % (табл. 1).

Трахибазальты, проявленные в потоках на северном склоне конуса вулкана Ван-Тянь, содержат 7.1–7.9 мас. % ($Na_2O + K_2O$) с преобладанием Na_2O над K_2O , 2.3–2.6 мас. % TiO_2 , до 9.8 мас. % Fe_2O_3 , 17.4–18.9 мас. % Al_2O_3 и характеризуются высокой концентрацией P_2O_5 (0.6–0.8 мас. %) при содержании SiO_2 , равном 50.0–51.5 мас. % (табл. 1).

Трахиандезиты содержат до 8.3 мас. % щелочей, при этом Na_2O резко преобладает над K_2O . Содержание Fe_2O_3 в них варьирует от 5.7 до

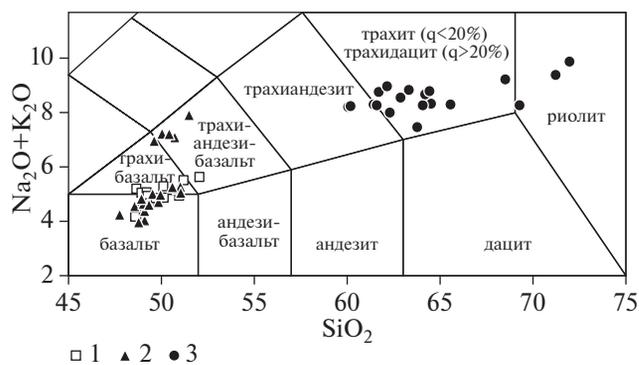


Рис. 2. Химический состав пород (мас. %) вулкана Ван-Тянь на классификационной диаграмме (Le Bas et al., 1986). 1 – щитовая постройка периода Чанбай, 2 – конус вулкана – период Ван-Тянь, 3 – нэкки и купол периода Хонгтоушань.

Таблица 1. Представительные химические составы (мас. %) пород вулкана Ван-Тянь

Компоненты	Щитовая постройка				Конус					Нэки и купол		
	В-15	В-19	В-101	ВТЕ-8	В-104	В-106	В-12	В-14	ВТЕ-15	ВТЕ-2	В-13	В-108
SiO ₂	48.66	48.66	49.70	59.81	49.11	48.82	50.72	51.49	60.15	62.84	64.49	68.47
TiO ₂	3.30	2.44	3.49	0.74	3.24	3.75	2.58	2.29	1.27	1.05	0.90	0.41
Al ₂ O ₃	15.80	18.51	13.88	16.69	14.53	13.20	18.93	18.66	14.50	14.24	14.06	13.88
Fe ₂ O ₃	13.14	9.62	14.87	5.71	13.68	15.21	9.75	9.77	8.30	8.35	6.77	5.44
MnO	0.17	0.13	0.17	0.10	0.158	0.18	0.16	0.16	0.17	0.17	0.12	0.10
MgO	2.74	2.98	4.07	1.74	4.58	4.44	2.54	2.09	0.87	0.68	0.58	0.07
CaO	8.17	9.62	7.86	2.54	8.47	7.86	6.38	5.99	3.44	2.41	2.40	1.24
Na ₂ O	3.68	3.17	3.34	5.61	2.88	3.48	4.55	4.95	4.60	4.80	4.48	4.53
K ₂ O	1.54	1.09	1.53	2.01	1.17	1.27	2.56	2.98	3.66	3.77	3.86	4.71
P ₂ O ₅	0.71	0.36	0.57	0.29	0.50	0.61	0.64	0.77	0.48	0.34	0.22	0.06
П.п.п.	1.26	2.66	0.23	4.49	1.42	0.89	0.00	0.00	2.11	1.01	1.27	0.69
Na ₂ O + K ₂ O	5.22	4.26	4.87	7.62	4.05	4.75	7.11	7.93	8.26	8.57	8.34	9.24
Сумма	99.17	99.24	99.71	99.73	99.74	99.71	98.81	99.15	99.56	99.66	99.15	99.60

Примечание. Образцы: В-15–В-101 и В-104–В-106 – субщелочные базальты, В-12 и В-14 – трахиандезитобазальты, ВТЕ-8 и ВТЕ-15 – трахиандезиты, ВТЕ-2–В-108 – трахиты. П.п.п. – потери при прокаливании.

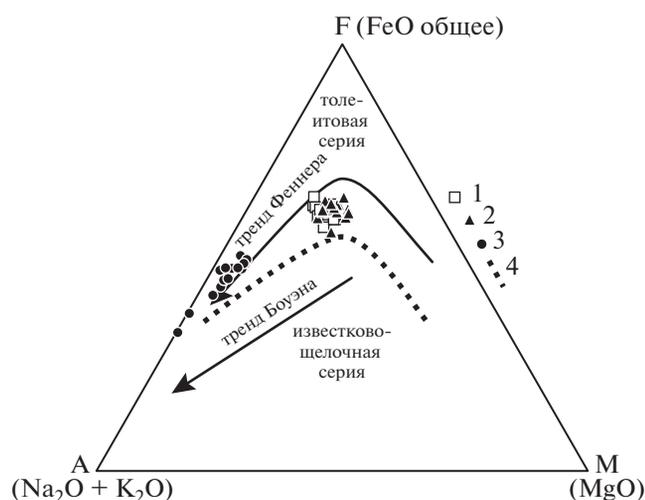


Рис. 3. Химический состав пород вулкана Ван-Тянь на классификационной диаграмме AFM. 1 – щитовая постройка периода Чанбай, 2 – конус вулкана – период Ван-Тянь, 3 – нэки и купол периода Хонгтоушань. Линия, разделяющая толеитовую и известково-щелочную серии, по (Irvine, Baragar, 1971). Стрелками отмечены боуэновский и феннеровский тренды кристаллизационной дифференциации.

8.8 мас. % при содержаниях (мас. %): TiO₂ – 0.7–1.3, Al₂O₃ – 14.5–16.7 и SiO₂ – 60 (в среднем) (табл. 1).

Трахиты имеют широкое поле составов (рис. 2). Содержание (Na₂O + K₂O) в них варьирует в интервале 7.5–8.9 мас. % с преобладанием Na₂O над K₂O при содержании SiO₂ в диапазоне 61.5–68.5 мас. %. Для трахитов также характерно высокое содержание Fe₂O₃, которое уменьшается при увеличении кремнекислоты от 9.2 до 5.4 мас. %, в том же ряду изменяются содержания TiO₂ от 1.3 до 0.4 мас. % и P₂O₅ от 0.5 до 0.06 мас. % (табл. 1).

На AFM-диаграмме (рис. 3) видно, что преобладающее поле составов базальтов располагается выше линии Ирвина–Барагара и относится к толеитовой серии. На этой диаграмме показаны также направления трендов магматической эволюции по феннеровскому и боуэновскому типу. Феннеровский путь эволюции расплавов характеризуется сначала их обогащением FeO, а затем снижением содержания железа и увеличением концентрации щелочей в кислых вулканитах. Как видно на рис. 3, составы базальтов вулкана Ван-Тянь тяготеют к феннеровскому тренду эволюции магм. На продолжении этого тренда находятся составы кислых щелочных пород.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

В настоящей статье приведены результаты исследования толеитовых базальтов, отобранных из разреза щитовой платформы вулкана Ван-Тянь. Образцы В-15 и В-19 взяты соответственно из нижнего и верхнего потоков в юго-восточной части щитового основания вулкана, а обр. В-101 отобран из нижнего потока в южной части лавового щита. В целом базальты обладают схожими чертами как с точки зрения петрографической характеристики, так и в отношении химического состава (табл. 1). Они представляют собой массивные порфировые породы темно-серого цвета с мегакристами плагиоклаза ($An_{74.3-77.4}Ab_{22.4-25.5}Or_{0.1-0.2}$) размером до двух сантиметров. Нередко в плагиоклазе базальтов наблюдаются сульфидные глобулы размером 20 мкм в среднем. Глобулы зональны, и их состав варьирует от центральных зон, представленных пирротинином с 2.1 мас. % Ni и 0.1 мас. % Cu, до кубанита во внешних зонах с содержанием железа – 34 мас. %, меди – 22.5 мас. % и примесью никеля до 1 мас. %. В образце из верхнего потока щитовой “платформы” (обр. В-19) обнаружены единичные резорбированные зерна оливина ($Fo = 74$). Ядра оливина полностью растворены и заполнены основной массой, сохранились только их краевые реакционно измененные зоны. Судя по этим показателям, можно полагать, что оливин является неравновесным минералом, ксеногенным для изученных базальтов. Вследствие этого можно считать, что плагиоклаз является первой ликвидусной фазой в этих породах.

В числе минералов основной массы установлены оливин ($Fo = 43.2-56.4$), клинопироксен, отвечающий по составу титанавгиту ($Mg\# = 0.64-0.70$), ильменит, титаномагнетит и фторапатит. Содержание F во фторапатите достигает 4.2 мас. %, а Se_2O_3 – 0.3 мас. %. В базальтах юго-восточной части щитовой “платформы” вулкана (обр. В-15, В-19) в качестве минералов основной массы, а также в виде оцелли установлены карбонаты. Карбонаты основной массы имеют неправильную, реже – ромбическую, форму. Они зональны, содержания CaO в них варьирует от 2 до 28 мас. %, MgO – 7–23 мас. %, FeO – 18–23 мас. %. В этих карбонатах наблюдаются кристаллические включения плагиоклаза призматической формы размером до 100 мкм. Кроме того, карбонаты фиксируются в качестве кристаллических фаз размером 200 мкм в плагиоклазе. По всей вероятности, это свидетельствует о том, что карбонаты в изученных базальтах (обр. В-15, В-19) имеют магматическую природу.

В основной массе всех изученных толеитовых базальтов наблюдается желто-бурое аморфное, зачастую пористое вещество, иногда зональное с радиальными или неправильными трещинами наподобие трещин усыхания (рис. 4а, 4б). Выделения этого вещества занимают интерстициальное положение и обрамляются микролитами основной массы. Иногда такие выделения имеют глобулярную форму, напоминающую “лопнувший пузырь” (рис. 4а). По своим структурно-текстурным особенностям это вещество напоминает палагонит. Однако под термином “палагонит” подразумевается весь спектр аморфных и слабопреломляющих образований переменного состава, охватывающий все разновидности водосодержащих стекол и минералов, генезис которых может быть разнообразным – как первично-магматическим, так и связанным с вторичными изменениями стекол или минералов (Сазонова, 1938; Куплетский, 1940; Рябов, 1989). Содержание SiO_2 в палагонитообразном веществе основной массы изученных пород варьируют, как правило, от 48 до 55 мас. %, FeO – 18–25 мас. %, MgO – 8–15 мас. %, Al_2O_3 – 0.7–1.6 мас. %, CaO – 0.9–1.7 мас. %, сумма щелочей не превышает 0.4 мас. % (табл. 2). Судя по дефициту суммы, содержание воды в этой фазе может достигать 10–15 мас. %. В связи с этим желто-бурое палагонитообразное губчатое вещество основной массы толеитов мы будем называть водосодержащим стеклом.

Наряду с водосодержащим стеклом в основной массе базальта обр. В-19 фиксируются “сухие” стекла, характеризующиеся двумя контрастными и весьма необычными составами – железистым и кислым. Стекла железистого состава образуют глобулы, которые заключены в стеклах кислого состава (табл. 2, рис. 4б–4г). Содержание SiO_2 в кислом стекле варьирует от 70 до 77 мас. %, сумма щелочей – до 9.4 мас. % с преобладанием K_2O (до 7.5 мас. %) над Na_2O (до 2.6 мас. %). Отношение Na/K варьирует в диапазоне 0.2–0.3. Концентрации Al_2O_3 в кислом стекле составляют 10.5–14 мас. %, CaO – 0.2–2.2 мас. %, FeO – 0.6–2.2 мас. % и TiO_2 – 0.9–1.5 мас. % (табл. 2). Железистые глобулы зачастую тонко раскристаллизованы, их состав характеризуется крайне низким содержанием SiO_2 – 30–40 мас. % при высоких концентрациях FeO – до 39 мас. %, TiO_2 – 12.5–18.7 мас. %, P_2O_5 до 7.4 мас. % и SO_3 до 0.8–2.0 мас. % (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав (мас. %) представительных стекол в основной массе толеитовых базальтов вулкана Ван-Гянь

Компоненты	“Сухое” железистое стекло				“Сухое” кислое стекло				Водосодержащее железистое стекло			
	В-19-1	В-19-2	В-19-3	В-19-4	В-19-5	В-19-6	В-19-7	В-19-8	В-101-2	В-101-3	В-19-9	В-19-10
SiO ₂	27.85	32.29	25.00	30.12	71.81	75.44	73.57	77.11	46.24	53.76	48.42	52.41
TiO ₂	14.13	6.31	18.66	12.50	0.59	1.61	2.70	1.09	0.01	0.02	0.13	0.04
Al ₂ O ₃	1.79	1.94	1.03	1.02	13.68	10.39	10.32	10.65	3.48	0.85	1.42	0.90
FeO	36.96	30.71	33.24	39.34	2.24	1.30	3.29	0.65	25.02	18.27	26.10	18.71
MnO	0.51	0.68	0.63	0.59	0.15	0.03	0.07	0.06	0.29	0.09	0.11	0.09
MgO	0.50	2.16	2.04	1.86	0.22	0.02	0.12	0.02	8.49	15.07	8.03	15.15
CaO	9.03	12.26	10.39	8.15	2.16	0.54	1.30	0.29	1.43	0.95	1.70	0.91
Na ₂ O	0.26	1.04	0.31	0.30	2.20	1.48	1.60	1.16	0.05	0.11	0.12	0.08
K ₂ O	0.65	1.06	0.34	0.17	5.99	5.80	5.23	6.41	0.11	0.33	0.08	0.39
P ₂ O ₅	7.38	8.03	7.16	4.21	0.11	0.30	0.53	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00
SO ₃	1.75	1.26	1.36	2.01	0.05	0.09	0.15	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02
ZrO ₂	0.37	0.15	0.44	0.48	0.03	0.11	0.09	0.16	0.09	0.00	0.01	0.01
Cl	0.27	0.27	0.21	0.12	0.05	0.11	0.12	0.13	0.00	0.02	0.03	0.00
F	—	—	—	—	0.07	0.03	0.04	0.00	—	—	—	—
Ce ₂ O ₃	0.42	0.37	0.50	0.31	0.03	0.09	0.15	0.08	0.00	0.03	0.07	0.01
Сумма	102.30	98.99	101.75	101.49	99.36	97.30	99.23	97.88	85.40	89.58	86.36	88.79

Примечание. FeO — железо общее. Прочерк — содержание не определялось.

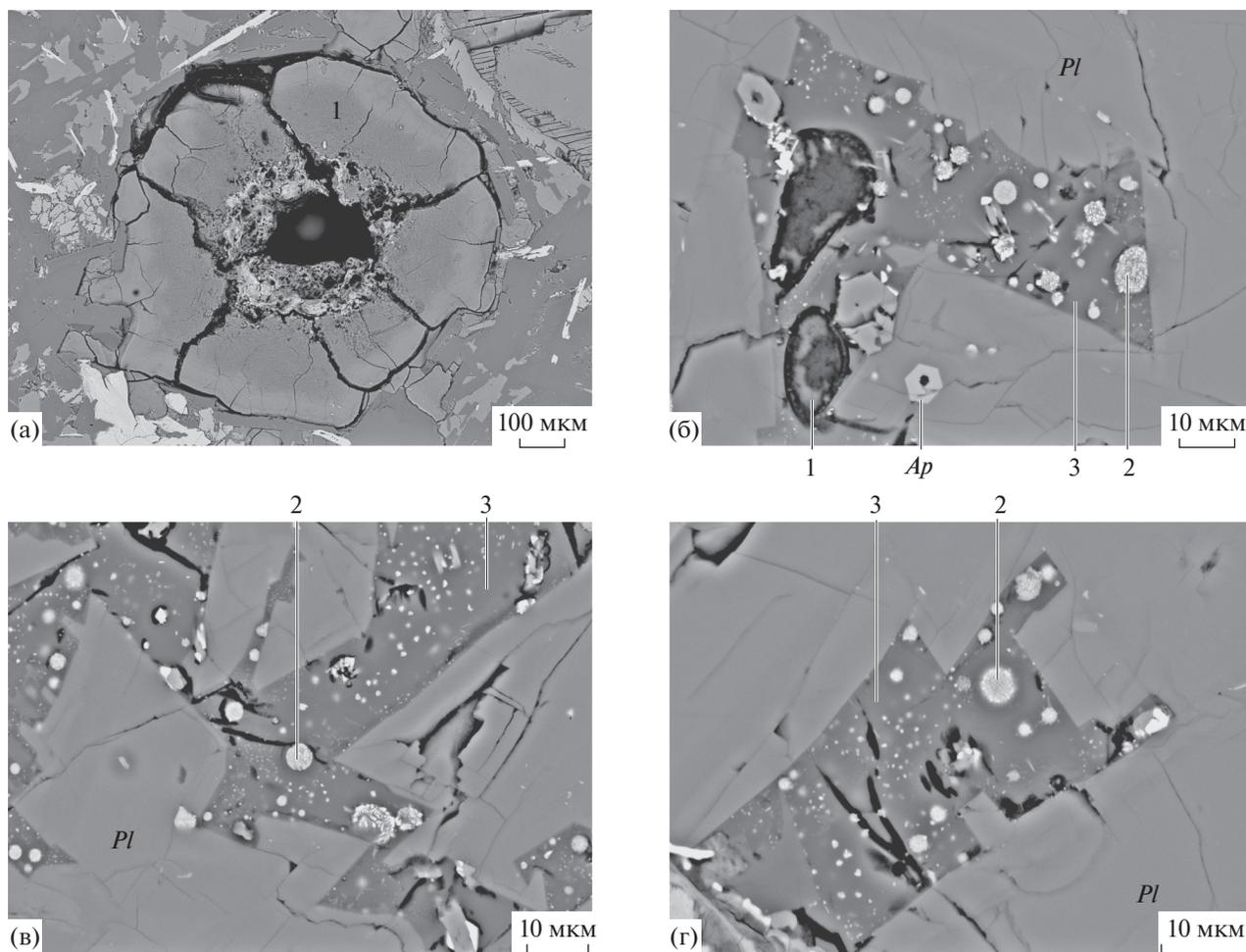


Рис. 4. Интерстициальные стекла основной массы толеитовых базальтов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь (а, б, в, г), в отраженных электронах. 1 – водосодержащее стекло, 2 – “сухое” железистое стекло, 3 – “сухое” кислое стекло. *Ap* – апатит, *Pl* – плагиоклаз.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Породы вулкана. Содержания главных компонентов пород определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в ИГЕМ РАН (г. Москва) на спектрометре последовательного действия PW-2400 производства компании Philips Analytical B.V. Точность анализа составляла 1–5 отн. % для элементов с концентрациями выше 0.5 мас. % и до 12 отн. % – для элементов с концентрацией ниже 0.5 мас. %.

Редкие и редкоземельные элементы в породах определяли на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) серии XII ICP-MS ThermoScientific в ИГЕМ РАН. Погрешность анализа составляла 1–3 отн. %.

Включения в минералах первоначально изучались оптически в полированных пластинках толщиной 0.2–0.3 мм. Эксперименты с расплавленными включениями проводились в муфельной печи, в ко-

торой для контроля температуры применялась термопара Pt-PtRh₁₀, калиброванная по точкам плавления K₂Cr₂O₇ ($T_{\text{пл}} = 398^{\circ}\text{C}$), NaCl ($T_{\text{пл}} = 800^{\circ}\text{C}$), Au ($T_{\text{пл}} = 1064^{\circ}\text{C}$). Учитывая погрешности калибровки термопары и градиент температур в рабочей зоне, общая погрешность измерения температуры оценивается в $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Для проведения термометрических экспериментов с визуальным контролем над расплавленными включениями использовалась микротермокамера LinkamTS1500. Микротермокамера оснащена платиновым нагревателем, контроль температуры осуществляется с помощью программного обеспечения Linksys. Перед каждой серией экспериментов камера калибровалась по точкам плавления NaCl ($T_{\text{пл}} = 800^{\circ}\text{C}$) и Au ($T_{\text{пл}} = 1064^{\circ}\text{C}$).

Изучение состава стекол гомогенизированных расплавленных включений, дочерних минеральных фаз во включениях, а также породообразующих

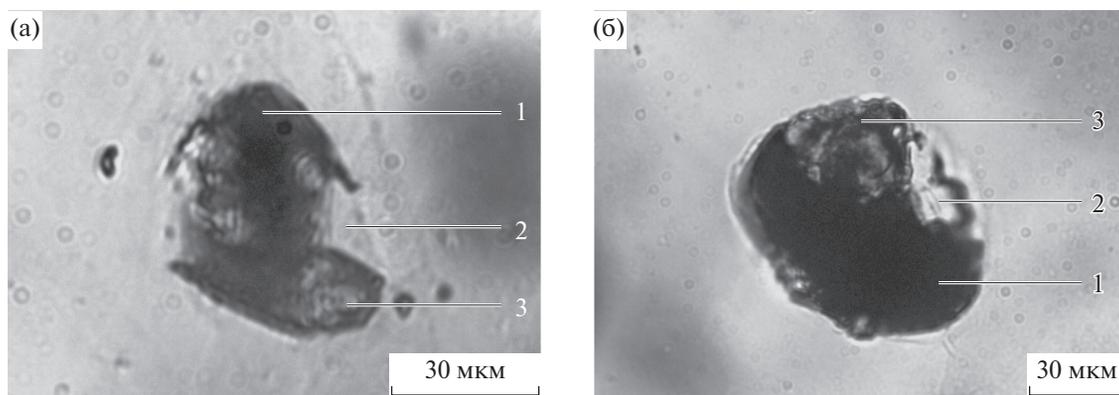


Рис. 5. Расплавные включения (а, б) в плагиоклазе толеитовых базальтов: исходные расплавные включения до нагревания, в проходящем свете без анализатора.

1 – тонкозернистый железистый агрегат, 2 – полевои шпат, 3 – водосодержащая глобула.

минералов и стекла основной массы пород проводилось в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL-JXA-8200, оснащённом 5-ю волновыми спектрометрами. Анализ минералов и стекол осуществлялся при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока зонда на цилиндре Фарадея 20 нА для минералов и 10 нА для стекол. Диаметр зонда для кристаллических фаз составлял 1 мкм, диаметр зонда для стекол зависел от размера стекла расплавного включения и выбирался в пределах от 2 до 10 мкм. Время экспозиции для всех элементов составляло 10 с. В качестве стандартов использовались минералы, близкие по составу к исследуемым фазам. Расчет поправок осуществлялся по методу ZAF с использованием программы фирмы JEOL.

Содержание H_2O в гомогенизированных расплавных включениях и глобулах водосодержащего стекла определялось методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) аналитиком С.Г. Симакиным на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники и информатики (ЯФ ФТИАН РАН, г. Ярославль) по методике, описанной А.В. Соболевым (Соболев, 1996).

Математическое моделирование. Для расчета пути фракционной кристаллизации толеитовых расплавов вулкана Ван-Тянь применялся программный комплекс КОМАГМАТ-5.2.2 (Ariskin et al., 2018), разработанный для толеитовых систем. Точность расчета температур кристаллизации составляет 10–15°C. Для минералов погрешность составляет от 1 до 5 мол. %. Состав расплава рассчитан с точностью до 0.5 мас. % (в зависимости от пропорций кристаллов и расплава).

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ПЛАГИОКЛАЗЕ БАЗАЛЬТОВ

Первичные расплавные включения установлены в плагиоклазе базальтов вулкана Ван-Тянь (обр. В-15, В-19, В-101). Они располагаются азонально, имеют округлую или эллипсоидную форму и размеры 30–120 мкм, но, как правило, их размеры варьируют от 50 до 100 мкм (рис. 5). Включения в плагиоклазе всех изученных базальтов частично или полностью раскристаллизованы и состоят, как правило, из “сухого” железистого стекла или тонкозернистого агрегата, сложенного клинопироксеном, титаномagnetитом, ильменитом, апатитом и сульфидами. Кроме того, они содержат широкие зональные полевошпатовые каймы. Состав кайм изменяется от внешней к внутренней стороне включений от плагиоклаза ($An_{46-56}Ab_{39-47}Or_{4-7}$) до анортоклаза ($An_{13-13.5}Ab_{43-50}Or_{36-43}$) (рис. 6, табл. 3). Железистое стекло и тонкозернистый минеральный агрегат были проанализированы на микрозонде с использованием расширенного пучка диаметром 10 мкм. Составы железистого стекла и тонкозернистого агрегата схожи и характеризуются высокими содержаниями (мас. %): FeO до 24, CaO до 10, MgO – 12, TiO_2 до 6, Al_2O_3 не более 2, $(Na_2O + K_2O)$ – 1, P_2O_5 – 1, SO_3 – 0.3–0.4 при содержании SiO_2 от 40 до 43 мас. % (табл. 3). Судя по всему, тонкозернистый минеральный агрегат во включениях представляет собой раскристаллизованное железистое стекло. Следует отметить, что состав железистого стекла во включениях в целом приближается к составу железистого стекла основной массы, но отличается более низкими содержаниями FeO, TiO_2 и P_2O_5 (табл. 2, 3).

Большинство изученных включений помимо полевошпатовых кайм и “сухого” железистого стекла (или раскристаллизованного тонкозерни-

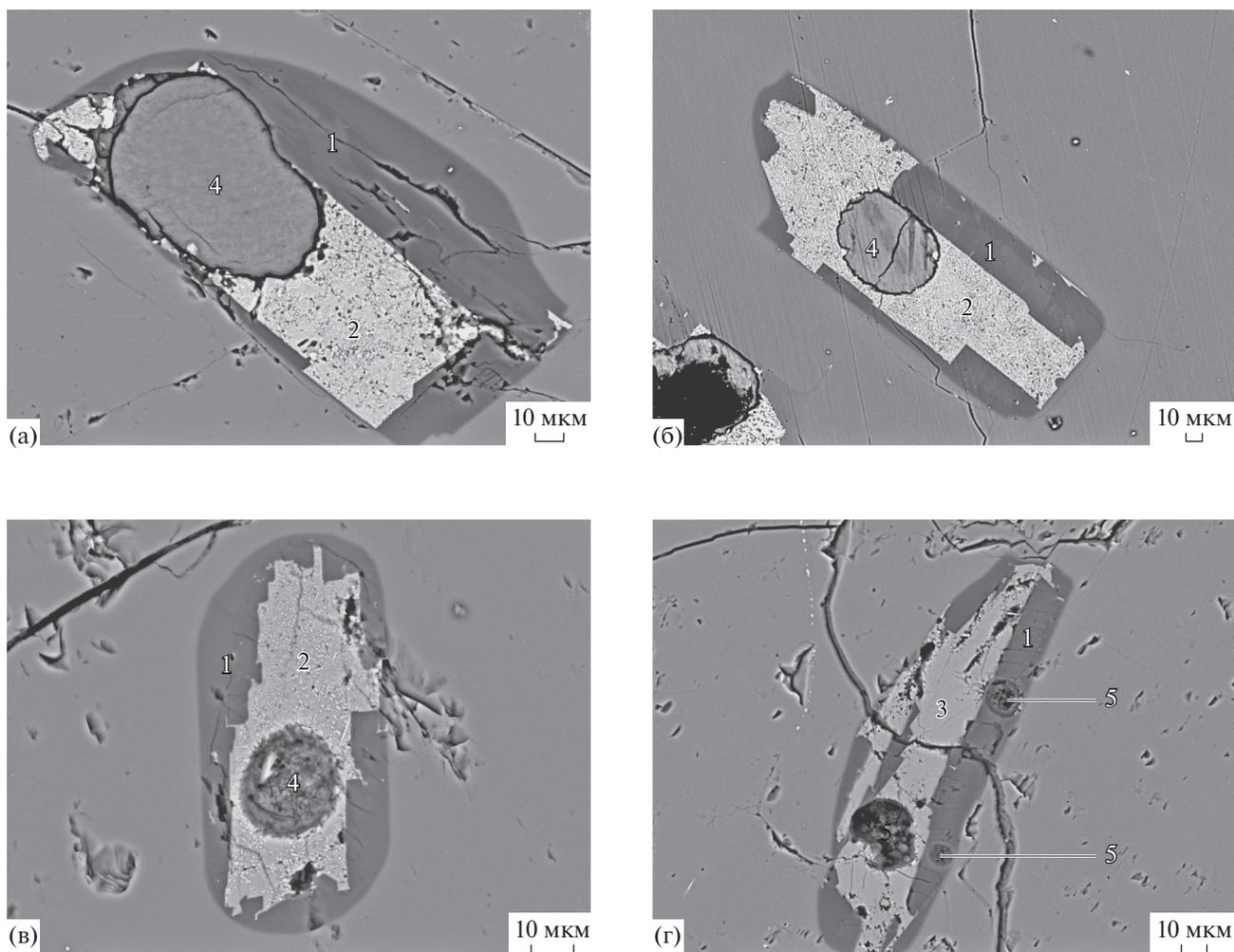


Рис. 6. Расплавные включения в плагиоклазе толеитовых базальтов при $T = 20^\circ\text{C}$ (а, б, в, г), в отраженных электронах. 1 – полевошпатовая кайма, 2 – тонкозернистый железистый агрегат, 3 – “сухое” железистое стекло, 4 – водосодержащая железистая глобула, 5 – водосодержащая кислая глобула.

стого минерального агрегата) содержат глобулы различного состава: 1) водосодержащие железистые глобулы (рис. 6а–6в), 2) водосодержащие кислые глобулы (рис. 6г), 3) “сухие” глобулы кислого стекла (рис. 7).

Водосодержащие железистые глобулы встречаются во включениях в плагиоклазе всех изученных базальтов. Они содержат (мас. %): до 29 FeO, 6 MgO, 2–7 Al₂O₃, до 2 K₂O, 1 CaO при 45–51 мас. % SiO₂ с общей суммой компонентов 85–90 мас. % (табл. 3, рис. 6а–6в). С помощью ионнозондовых определений (SIMS) было установлено, что в составе таких глобул присутствует не менее 4 мас. % H₂O (табл. 3). По дефициту суммы можно предположить, что содержание воды в глобулах составляет 10–15 мас. %. По составу эти глобулы идентичны водосодержащему железистому стеклу основной массы.

Водосодержащие глобулы кислого состава – пористые и аморфные – встречаются редко и обнаружены во включениях в плагиоклазе базальтов нижнего потока юго-восточного сегмента щита Ван-Тянь (обр. В-15). В составе таких глобул (рис. 6г) установлено (в мас. %): до 9 Al₂O₃, 1.6 Na₂O, 3 K₂O, 0.8 FeO, 0.2 P₂O₅ при 74 SiO₂ (табл. 3). Отношение Na/K составляет 0.4–0.5. Общая сумма компонентов достигает 90 мас. %. На дефицит суммы в таких глобулах отчасти может влиять трещиноватая и пористая неровная поверхность, что искажает точность анализа. Однако в водосодержащих железистых глобулах со схожей морфологией установлена значительная концентрация воды (не менее 4 мас. %). Можно предположить, что такие глобулы кислого состава также содержат воду. Кроме того, эти глобулы

Таблица 3. Химический состав (мас. %) стекла и дочерних минералов расплавных включений в плагиоклазе базальтов, а также в плагиоклазе-хозяине

Компоненты	Плагиоклаз-хозяин					Расплавные включения					
						а			б		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	53.43	53.10	53.43	52.88	53.77	55.59	60.97	65.31	65.90	42.94	43.15
TiO ₂	0.10	0.13	0.09	0.12	0.10	0.12	0.12	0.17	0.10	5.68	5.72
Al ₂ O ₃	29.21	29.17	28.50	29.20	29.62	28.25	24.86	20.36	21.64	1.94	2.01
FeO	0.54	0.59	0.59	0.62	0.52	0.72	0.58	0.46	0.64	24.16	23.41
MnO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.33	0.33
MgO	0.13	0.10	0.14	0.11	0.13	0.18	0.11	0.04	0.02	10.88	11.75
CaO	12.17	12.52	12.09	12.85	12.64	10.91	6.56	1.43	2.48	10.20	10.34
Na ₂ O	4.34	4.21	4.39	4.09	4.31	4.94	6.88	4.88	6.23	0.68	0.72
K ₂ O	0.33	0.31	0.35	0.29	0.28	0.51	1.20	8.05	5.50	0.43	0.37
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.95	0.88
SO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38	0.34
Cl	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.03	0.02
F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	100.37	100.12	99.59	100.19	101.38	101.23	101.33	100.78	102.66	98.80	99.29
Компоненты	Расплавные включения										
	в		г						д		
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
SiO ₂	40.39	43.83	73.80	69.71	71.81	70.45	72.07	74.01	44.73	46.18	46.24
TiO ₂	7.36	6.47	0.48	0.74	0.59	0.62	0.94	0.12	0.06	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	2.74	2.91	14.19	13.54	13.68	14.06	13.57	9.17	3.23	3.53	3.48
FeO	26.10	23.35	1.26	1.68	2.24	1.81	1.66	0.83	21.16	24.25	25.02
MnO	0.43	0.35	0.09	0.02	0.15	0.01	0.04	0.00	0.35	0.28	0.29
MgO	10.12	10.07	0.07	0.17	0.22	0.04	0.18	0.20	7.69	8.27	8.49
CaO	9.70	10.01	0.99	1.40	2.16	0.88	1.13	1.51	1.85	1.43	1.43
Na ₂ O	0.62	0.85	1.03	2.56	2.20	2.02	2.18	1.58	0.11	0.05	0.05
K ₂ O	0.42	0.71	4.69	5.83	5.99	6.07	5.90	3.09	0.48	0.12	0.11
P ₂ O ₅	1.03	1.14	0.05	0.13	0.11	0.22	0.21	0.23	0.00	0.02	0.02
SO ₃	0.00	0.00	0.30	0.27	0.05	0.06	0.00	0.03	0.00	0.00	0.09
Cl	0.05	0.04	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07	0.01	0.57	0.01	0.00
F	—	—	0.02	0.06	0.07	0.07	0.44	0.00	—	—	—
Сумма	99.66	100.30	97.20	96.37	99.36	96.39	98.19	90.84	84.17*	84.30	85.40

Примечание. FeO – железо общее. а – зональная кайма расплавного включения от внешней зоны к внутренней: б – внешняя зона, 9 – внутренняя зона; б – железистое силикатное стекло (10, 11); в – тонкозернистый железистый агрегат (12, 13); г – глобулы кислого стекла (14–19); д – глобулы железистого водосодержащего стекла (20–22). Прочерк – содержание не определялось. *Сумма приведена с учетом содержания H₂O = 3.97 мас. %.

отмечаются во включениях как в железистом стекле, так и в полевошпатовых каймах.

“Сухие” кислые глобулы зафиксированы в расплавных включениях в плагиоклазе базальтов (обр. В-19). Они содержат (мас. %): до 13.5 Al_2O_3 , 6 K_2O , 2.2 Na_2O при отношении Na/K, равном 0.2–0.3, и содержании SiO_2 от 71.5 до 72 мас. % (табл. 3, рис. 7а, 7в). Сумма компонентов, как правило, составляет 95–99 мас. %. Также “сухие” кислые глобулы встречаются во включениях с ярковыраженной микровариолитовой структурой (рис. 7б, 7в). Кроме того, в “сухом” железистом стекле и в “сухих” кислых глобулах качественно определены водосодержащие железистые глобулы (рис. 7б). Иногда в таких включениях наблюдаются крупные фазы, представленные ильменитом, вероятно, ксеногенным.

Термометрические эксперименты с расплавными включениями в плагиоклазе толеитовых базальтов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь показали, что первые признаки плавления в них наблюдаются при $T = 1070–1080^\circ C$. Полная или частичная гомогенизация происходит при $T = 1180–1200^\circ C$ (рис. 8). После эксперимента включения содержат стекло \pm сульфидную глобулу \pm газовый пузырек.

Стекло по составу отвечает базальту с максимальным содержанием $(Na_2O + K_2O) = 5$ мас. %. Оно является железистым (FeO 11.5–12.5 мас. %) и высокотитанистым (TiO_2 до 4 мас. %). Также оно характеризуется высокими концентрациями P_2O_5 (до 0.8 мас. %) и SO_3 (до 0.6 мас. %) (табл. 4). Содержание H_2O в нем низкое и варьирует от 0.1 до 0.8 мас. %.

Сульфидные глобулы, установленные в расплавных включениях после термометрических экспериментов, отвечают по составу FeS с высокими содержаниями примесей: Ni – от 3.9 до 7.2 мас. % и Cu – от 1.9 до 5.3 мас. %. Присутствие сульфидных глобул в стекле гретых расплавных включений, а также, как отмечалось выше, в плагиоклазе базальтов указывает на то, что в магматическом очаге вместе с силикатным расплавом существовали капли несмесимой с ним сульфидной жидкости, насыщенной Ni и Cu.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКЦИОННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТОЛЕИТОВЫХ РАСПЛАВОВ ВУЛКАНА ВАН-ТЯНЬ

Для математического моделирования фракционной кристаллизации толеитовых расплавов вулкана Ван-Тянь нами была проведена оценка

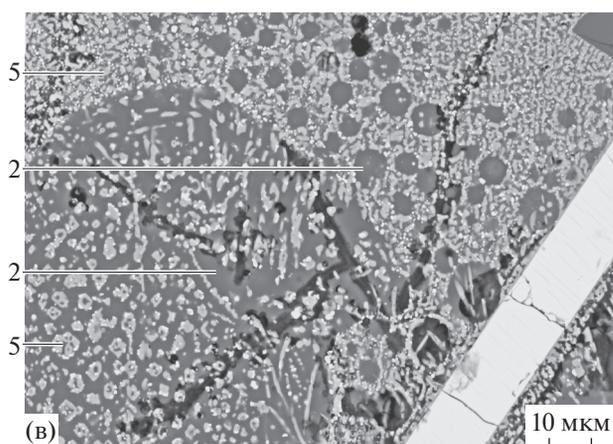
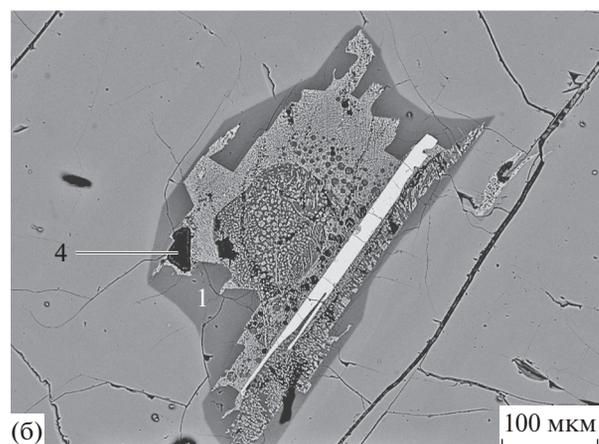
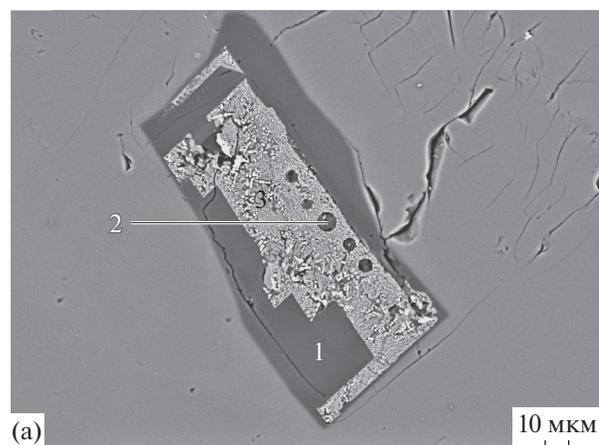


Рис. 7. Расплавные включения в плагиоклазе толеитовых базальтов при $T = 20^\circ C$ (а, б), в отраженных электронах. (в) – увеличенный фрагмент включения (б). 1 – полевошпатовая кайма, 2 – “сухая” кислая глобула, 3 – тонкозернистый железистый агрегат, 4 – водосодержащая железистая глобула, 5 – “сухое” железистое стекло.

фугитивности кислорода по паре титаномагнетит–ильменит, установленных в качестве минералов основной массы в базальте обр. В-19. Расчеты фуги-

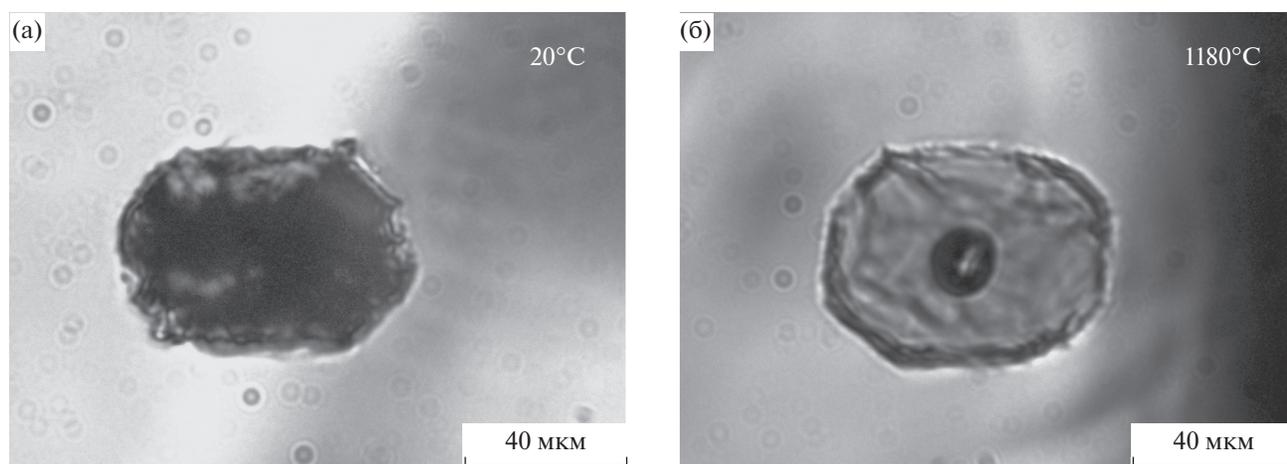


Рис. 8. Расплавные включения в плагиоклазе толеитовых базальтов, в проходящем свете без анализатора: (а) – при температуре 20°C, (б) – при температуре 1180°C.

тивности кислорода проводились с использованием модели (Ghiorso, Evans, 2008), основанной на зависимости fO_2 от термодинамических параметров ромбоэдрических твердых растворов в системе $Fe_2O_3-FeTiO_3-MgTiO_3-MnTiO_3$. Для рас-

четов был использован шпинель-ильменитовый окситермобарометр. Температура, полученная при расчете по окситермобарометру для пары титаномagnetит–ильменит составила 950°C, $\Delta fO_2 = NNO - 0.86$. Рассчитанный $lgfO_2$ соответствует

Таблица 4. Химический состав (мас. %) стекол гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе толеитовых базальтов вулкана Ван-Тянь

Компоненты	В-19-1	В-19-2	В-19-3	В-19-4	В-101-1	В-101-2	В-101-3	В-101-4	В-15-1	В-15-2	В-15-3	В-15-4
$T, ^\circ C$ гомог.	1190	1190	1190	1180	1185	1185	1185	1175	1195	1195	1200	1205
SiO ₂	48.78	48.15	48.63	50.33	49.29	48.82	47.96	48.24	49.69	49.47	51.13	51.69
TiO ₂	3.64	3.47	3.60	2.87	2.52	2.85	3.35	3.17	3.00	3.14	2.79	2.49
Al ₂ O ₃	16.35	16.48	16.42	16.19	16.13	17.69	16.37	16.36	16.43	16.16	17.09	16.90
FeO	11.71	12.09	11.85	11.41	11.70	10.29	11.66	11.59	11.00	10.83	9.47	8.91
MnO	0.22	0.13	0.16	0.09	0.13	0.13	0.17	0.20	0.19	0.05	0.11	0.10
MgO	4.33	4.57	4.46	3.95	2.97	3.98	4.41	4.33	4.49	4.44	4.36	3.69
CaO	8.50	8.51	8.67	8.08	10.63	8.76	8.95	8.73	9.04	9.03	8.79	8.95
Na ₂ O	3.14	3.00	2.99	2.98	2.53	3.06	3.17	3.15	3.56	3.52	4.10	3.85
K ₂ O	1.32	1.28	1.29	1.59	0.90	1.06	0.96	0.88	1.12	1.10	1.44	1.36
P ₂ O ₅	0.57	0.61	0.60	0.43	0.50	0.47	0.50	0.49	0.43	0.45	0.34	0.44
SO ₃	0.62	1.65	0.52	0.51	0.04	0.00	0.19	0.23	0.31	0.33	0.28	0.24
Cl	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01
F	0.17	0.11	0.26	0.07	0.14	0.03	0.04	0.09	0.08	0.11	0.13	0.00
H ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	0.44	0.82	—	—
Сумма	99.34	100.05	99.39	98.53	97.51	97.15	97.78	97.42	99.44	98.71	100.04	98.69

Примечание. FeO – железо общее. Прочерк – содержание не определялось.

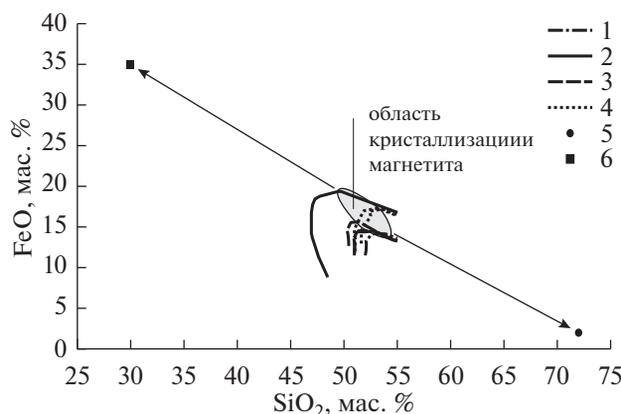


Рис. 9. Пути фракционирования толеитовых магм вулкана Ван-Тянь, рассчитанные по (Ariskin et al., 2018). 1–3 – тренды фракционирования базальтовых расплавов вулкана Ван-Тянь: 1 – обр. В-19, 2 – обр. В-15, 3 – обр. В-101; 4 – эволюция остаточных магм массива Скаергард; 5 – “сухое” кислое стекло в основной массе базальта вулкана Ван-Тянь; 6 – “сухое” железистое силикатное стекло в основной массе вулкана Ван-Тянь. Стрелками показано положение составов двух контрастных жидкостей, образовавшихся в процессе ликвации.

–11.79, что отвечает буферу QFM. В связи с этим для расчета пути фракционной кристаллизации в программе КОМАГМАТ-5.2.2 нами использовался буфер QFM.

При численном моделировании фракционной кристаллизации толеитовых расплавов вулкана Ван-Тянь мы использовали составы стекол гомогенизированных расплавных включений и пород для сравнения результатов расчетов.

Результаты численного моделирования в программе КОМАГМАТ-5.2.2 (Ariskin et al., 2018) с использованием составов стекол гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе базальтов показали, что расчетные температуры начала кристаллизации плагиоклаза согласуются с температурами, полученными в ходе термометрических экспериментов с включениями в плагиоклазе этих пород, и соответствуют 1180–1200°C. Состав плагиоклаза, рассчитанный по составу стекловых расплавных включений для базальта обр. В-19, соответствует $An_{70.8-78.7}Ab_{20.2-28.2}Or_{1-1.2}$, что отвечает составу вкрапленников полевого шпата ($An_{74.3-77.4}Ab_{22.4-25.5}Or_{0.1-0.2}$) из этого же образца, изученных при помощи электронного микронзонда. Результаты расчетов по породам оказались искаженными в отношении температур кристаллизации плагиоклаза и его состава. Так, рассчитанная по составам пород температура начала кристаллизации плагиоклаза варьирует от 1135°C в базальте обр. В-101 до 1260°C в базальте обр. В-19. Таким образом, для численного моделирования пути фракционной кристаллизации толеитовых расплавов вулкана Ван-Тянь, мы использовали составы стекол гомогенизированных расплавных

включений. Результаты численного моделирования приведены на рис. 9.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Феннеровский тренд эволюции толеитовых магм

В ходе проведенных исследований определен химический состав дочерних фаз негретых расплавных включений и стекол гомогенизированных включений в плагиоклазе толеитовых базальтов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь. Во всех изученных породах среди породообразующих минералов установлены фенокристы плагиоклаза, железисто-магнезиальные минералы выявлены только в основной массе пород. Они представлены оливином ($Fo = 43.2-56.4$) и титанавгитом ($Mg\# = 0.64-0.70$). Это дает основание полагать, что первым ликвидусным минералом является плагиоклаз ($An_{74.3-77.4}Ab_{22.4-25.5}Or_{0.1-0.2}$), кристаллизовавшийся из дифференцированного расплава при температурах 1180–1200°C. Результаты численного моделирования фракционной кристаллизации расплавов в программе КОМАГМАТ-5.2.2 подтверждают эти выводы. Как видно на рис. 9, все рассчитанные тренды фракционной кристаллизации толеитовых расплавов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь отражают резкое накопление оксида железа на начальных стадиях кристаллизации расплава, а затем его плавное уменьшение.

Рассмотрим подробнее поведение FeO при изменении содержания SiO_2 от 50 до 55 мас. %, что соответствует расчетному диапазону степени фракционирования от 0.5 до 43–53 мас. % кристаллов в

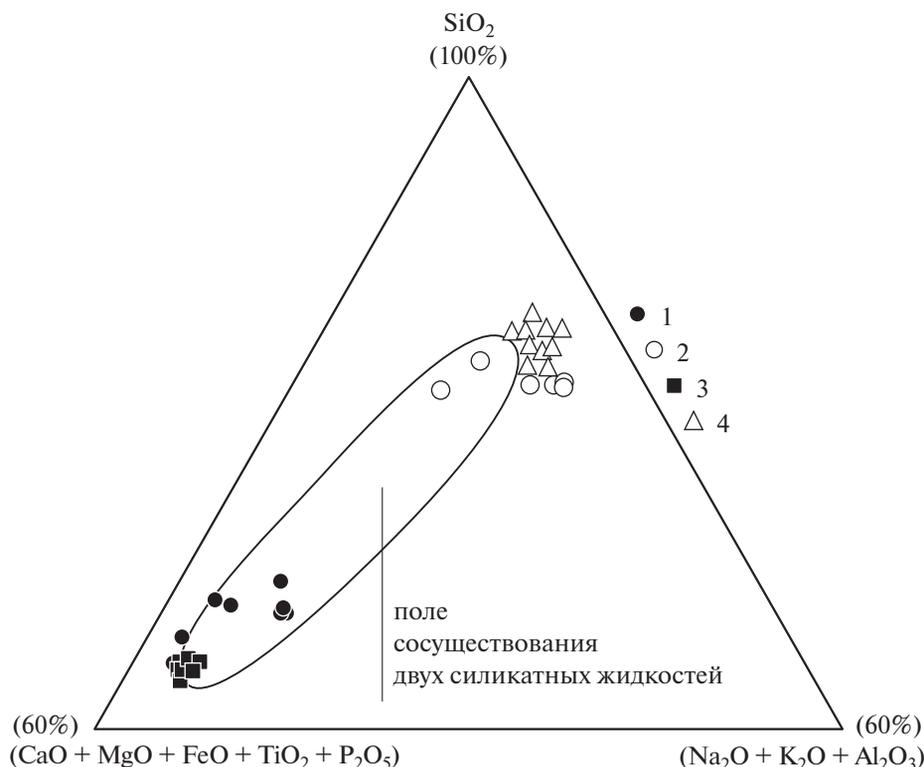


Рис. 10. Псевдотройная диаграмма (мас. %) Грейга (Roedder, 1951; Naslund, 1983).

1 – “сухое” железистое стекло расплавных включений, 2 – “сухие” кислые глобулы во включениях; 3 – “сухое” железистое стекло основной массы, 4 – “сухое” кислое стекло основной массы.

расплаве и температурному интервалу 1200–1080°C. Как видно на рис. 9, все расчетные тренды, соответствующие пути кристаллизации базальтов обр. В-15, В-19 и В-101, имеют субвертикальный уклон в начале кристаллизации базальтового расплава, который фиксирует существенное обогащение расплава железом при незначительных колебаниях концентрации SiO_2 . Такое взаимное поведение FeO и SiO_2 отражает фракционирование плагиоклаза из расплава. При дальнейшем резком увеличении концентрации FeO , вплоть до максимума (до 17 мас. %), относительно плавно возрастает содержание SiO_2 до 53–55 мас. %, где фиксируется изгиб линии фракционирования, отражающий постепенное уменьшение концентрации железа при постоянном увеличении содержания кремнекислоты. Крутой изгиб тренда кристаллизационной дифференциации сопоставляется с началом фракционирования магнетита (рис. 9). Таким образом, в диапазоне 50–55 мас. % SiO_2 прослеживается феннеровский тренд фракционирования расплавов, в процессе которого при несущественных колебаниях в содержании SiO_2 расплавы значительно обогащаются железом (до 17 мас. %). Излом линии фракционирования характеризует

переход от феннеровского к боуэновскому типу дифференциации расплавов, что обусловлено фракционированием магнетита. Таким образом, природа феннеровского типа дифференциации непосредственно связана с ролью кристаллизации плагиоклаза относительно железисто-магнезиальных силикатов, а переход к боуэновскому тренду – с фракционированием оксидов железа. При этом на путь магматической эволюции существенно влияет окислительно-восстановительный потенциал, поскольку в восстановительных условиях кристаллизация магнетита замедляется и, соответственно, расплав фракционирует по феннеровскому типу.

Как видно на рис. 9, феннеровский тип дифференциации магм вулкана Ван-Тянь сопоставим, в первую очередь, с трендом эволюции скаергардской магмы (Уэйджер, Браун, 1970; Hunter, Sparks, 1987). Как в случае с результатами моделирования фракционной кристаллизации скаергардской магмы (Уэйджер, Браун, 1970), так и толеитовых магм вулкана Ван-Тянь – максимальное содержание FeO в обоих случаях не превышает 15–18 мас. %. Кроме того, в интерстициальном пространстве изученных толеитовых базальтов вулкана Ван-

Тянь были установлены стекла с содержанием FeO до 29 мас. %, а в некоторых случаях вплоть до 39 мас. %, что характерно и для остаточных ферробазальтовых магм массива Скаергард (Naslund, 1984; Irvine et al., 1998; Veksler et al., 2007). Результаты численного моделирования и данные изучения стекол гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе толеитов вулкана Ван-Тянь показывают, что такое высокое содержание железа в расплаве невозможно получить в процессе кристаллизационной дифференциации базальтовых магм. При этом в изученных образцах базальтов наблюдаются глобулы железистого стекла с концентрацией FeO вплоть до 35–39 мас. % при содержании SiO₂ от 25 до 30 мас. % и сумме щелочей (Na₂O + K₂O), равной 0.5–2 мас. %, зафиксированные в кислом щелочном стекле с концентрацией SiO₂ до 75 мас. % и суммой (Na₂O + K₂O) до 9 мас. % при содержании FeO от 0.5 до 2 мас. %. Такие контрастные по составу расплавы могут образовываться в результате расслоения ферробазальтовых магм на две несмешивающиеся силикатные жидкости – кислую и железистую (рис. 9).

Силикатная жидкостная несмесимость

Признаки расслоения расплава на кислую и железистую силикатные составляющие фиксируются как в интерстициальном пространстве толеитовых базальтов вулкана Ван-Тянь, так и во включениях в плагиоклазе этих пород. Стекла с глобулярной структурой были выявлены в интерстициях толеитовых базальтов (обр. В-19). Состав стекол и обнаруженных в них глобул контрастен – в кислых стеклах фиксируются железистые глобулы (табл. 3) и, наоборот, кислые глобулы были установлены в железистом стекле расплавных включений. Характерно, что составы кислых стекол в интерстициальном пространстве пород и в расплавных включениях аналогичны друг другу. Для них типичны высокие концентрации K₂O до 7.5 мас. % и Na₂O до 2.6 мас. % и низкие содержания CaO – 0.2–2.2 мас. %, FeO – 0.6–2.2 мас. % и TiO₂ – 0.9–1.5 мас. % при концентрациях Al₂O₃ до 10.5–14 мас. % и SiO₂ – 70–77 мас. % (табл. 2, 3). При этом составы железистых глобул в кислом стекле из основной массы базальтов и железистого стекла в расплавных включениях заметно различаются (табл. 2, 3). Железистое стекло во включениях, иногда представленное тонкозернистым силикатным железистым агрегатом, содержит (мас. %): до 24 FeO, 12 MgO, до 6 TiO₂, 10 CaO и не более 2 Al₂O₃ и 1 (Na₂O + K₂O) при 40–43 мас. % SiO₂ (табл. 3). Оно отличается достаточно высо-

кими содержаниями P₂O₅ до 1 мас. % и SO₃ – 0.3–0.4 мас. %. Железистые глобулы в кислом стекле основной массы характеризуется существенно более высокими содержаниями (мас. %): FeO до 39, TiO₂ – 12.5–18.7, P₂O₅ до 7.4, SO₃ – 0.8–2.0 при низком содержании SiO₂ – 25–35 мас. %. Содержания FeO, TiO₂ и P₂O₅ в железистом силикатном стекле основной массы достигают практически рудных значений.

В системе кварц–фаялит–лейцит существует как высокотемпературное поле силикатной несмесимости ($T > 1690^{\circ}\text{C}$), так и низкотемпературная область устойчивости двух силикатных жидкостей (Roedder, 1951; Roedder, 1978) контрастного состава – силикатной железистой и кислой щелочной. Согласно экспериментальным исследованиям (Roedder, 1951, 1978; Visser, Koster van Groos, 1976), низкотемпературная область силикатной несмесимости ограничена узким интервалом: $T = 1100\text{--}1150^{\circ}\text{C}$. Было показано (Dixon, Rutherford, 1979; Veksler et al., 2007; Veksler et al., 2008; Charlier, Grove, 2012; Hou, Veksler, 2015; Hou et al., 2018), что поле устойчивости двух контрастных по составу силикатных жидкостей может быть шире или уже в зависимости от состава исходного ферробазальтового расплава, в частности содержания в нем летучих компонентов, таких как H₂O и P₂O₅, а также давления и летучести кислорода. Экспериментально (Charlier, Grove, 2012) доказано, что расслоение на кислую и железистую силикатные жидкости в толеитовых ферробазальтовых расплавах с низкой температурой ликвидуса – 1020–1040°C может происходить в близкиликвидусных (1000–1020°C) условиях. При этом кислый и железистый расплавы находятся в равновесии с габброидным минеральным парагенезисом (Charlier, Grove, 2012). В работе (Hou, Veksler, 2015) экспериментально продемонстрирована возможность расслоения железистых андезибазальтовых расплавов на две несмешивающиеся жидкости при температурах выше 1100°C, вплоть до сверхликвидусной несмесимости при $T = 1200^{\circ}\text{C}$. Однако в природных образцах контрастные по составу стекла, как правило, занимают интерстициальное положение в существующем минеральном парагенезисе, что указывает на поздние стадии их образования при формировании породы.

В природных объектах явление силикатной несмесимости было установлено, в первую очередь, в мафических–ультрамафических расслоенных комплексах, таких как Скаергард, а также в базальтовых лавах Сибирских траппов и андезитовых потоках провинции Донгаргар в Индии,

вулкана Эль Лако в Чили, в частности по данным изучения расплавных включений в плагиоклазе и клинопироксене, а также в риолитах дзунбаинской свиты Нилгинской депрессии в Центральной Монголии (Roedder, Weiblen, 1970; Philpotts, 1978, 1982; Рябов, 1989; Charlier et al., 2011; Holness et al., 2011; Jakobsen et al., 2011; Sensarma, Palme, 2013; Перетяжко, Савина, 2014; Kamenetsky et al., 2013; Fischer et al., 2016; Velasco et al., 2016).

Как видно из рис. 10, точки составов кислых и железистых стекол, обнаруженных нами в интерстициях толеитовых базальтов (обр. В-19) вулкана Ван-Тянь и в качестве глобул кислого и железистого стекла в расплавных включениях в плагиоклазе этих пород, располагаются в поле силикатной несмесимости. При этом точки составов кислых и железистых стекол тяготеют к краям этого поля, что обусловлено контрастностью их составов.

Основываясь на данных изучения толеитовых базальтов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь, а также результатах исследования расплавных включений в плагиоклазе этих пород, мы полагаем, что ликвация расплава на две силикатные несмешивающиеся жидкости осуществлялась после кристаллизации плагиоклаза, когда расплав был существенно обогащен FeO. В экспериментальных исследованиях также отмечается, что контрастные по составу силикатные стекла выявлены в интерстициальном пространстве между кристаллами плагиоклаза в продуктах опытов (Charlier, Grove 2012), что свидетельствует о проявлении силикатной несмесимости на поздних стадиях эволюции расплава.

Высокое содержание P_2O_5 в исходном толеитовом расплаве (до 0.6 мас. %) и в ликвировавшем железистом расплаве (до 7 мас. %) свидетельствует о том, что этот компонент оказывает существенное влияние на фазовое равновесие в системе, что в итоге приводит к силикатной несмесимости. Как было показано (Toplis, 1995; Charlier, Grove, 2012), фосфор способствует обогащению расплавов FeO в процессе кристаллизационной дифференциации, препятствуя кристаллизации магнетита, и тем самым потенциально влияя на увеличение доли плагиоклаза в расплаве. Кроме того, присутствие фосфора в системе понижает температуру ликвидуса и, соответственно, расширяет поле устойчивости двух несмешивающихся силикатных жидкостей — кислой и железистой.

Флюидно-магматические процессы при формировании толеитовых базальтов

Вопрос о формировании водосодержащих железистых (иногда кислых) глобул в “сухих” расплавных включениях на сегодняшний день остается нерешенным. Более того, это явление не воспроизводилось в эксперименте для базальтовых систем. Железистые водосодержащие глобулы по своему составу схожи с железистым водосодержащим стеклом основной массы изученных пород. Кислые водосодержащие глобулы встречаются редко и исключительно в расплавных включениях. В отличие от гидратированных железистых стекол, они не зафиксированы в основной массе пород. Это может быть обусловлено высокой мобильностью кислого, обогащенного H_2O расплава по сравнению с “сухим” кислым расплавом. Гидратированные железистые глобулы во включениях, как и водосодержащее железистое стекло основной массы, представлены пористым аморфным веществом. В гидратированных железистых глобулах выявлена высокая концентрация воды — не менее 4 мас. %, а судя по дефициту суммы — не менее 10–15 мас. %. Наблюдаются явные различия в составах водосодержащих железистых глобул и стекла основной массы от “сухого” железистого стекла во включениях. Помимо содержания воды эти различия фиксируются и по концентрациям CaO, TiO_2 , P_2O_5 и SO_3 . Содержание CaO в “сухом” железистом стекле расплавных включений варьирует в интервале 9–10 мас. %, тогда как в водосодержащем железистом стекле — не превышает 2 мас. %. Концентрация TiO_2 в “сухом” железистом стекле достигает 7 мас. %, тогда как в водосодержащем — не превышает 0.06 мас. %. Содержания P_2O_5 и SO_3 в “сухом” железистом стекле составляют 1 и 0.4–0.6 мас. % соответственно, тогда как в гидратированном железистом стекле фосфор и сера не обнаружены. Таким образом, при некотором сходстве составов “сухого” и водосодержащего железистых стекол выявлены и различия между ними.

Судя по составу гидратированных железистых глобул во включениях и водосодержащего железистого стекла основной массы пород (табл. 2, 3), их образование происходило в ходе единого процесса. Мы полагаем, что формирование водосодержащих расплавов протекало в ходе эволюции магм — одновременно или после расслоения ферробазальтового расплава на две контрастные по составу силикатные жидкости. Основанием для этого предположения служат два фактора. Во-первых, в составе гидратированных железистых стекол содержание FeO превышает 20 мас. %, что указывает на отделение водосодержащей фазы от

высокодифференцированного расплава в процессе или после ликвации на железистую и кислую силикатные жидкости. Во-вторых, как показали исследования гомогенизированных стекол расплавных включений, концентрация H_2O в исходном расплаве не превышает 0.8 мас. %. Следовательно, высокое, вплоть до 10–15 мас. %, ее содержание может быть достигнуто после кристаллизации всех безводных фаз, т.е. на заключительных стадиях эволюции расплава. При расслоении расплава могли образовываться железистые и кислые как “сухие”, так и водосодержащие силикатные жидкости. При понижении давления растворимость H_2O в силикатном расплаве уменьшается, и существенно обогащенный водой расплав быстро достигает границы поля несмесимости “расплав + флюид” (Mysen, 2014; Ballhaus et al., 2015). Согласно (Ballhaus et al., 2015), расплавы поднимаются к поверхности в виде эмульсий, состоящих из вязкого расплава и флюидной фазы. Контраст вязкости между отделяющимся флюидом и расплавом может быть небольшим, что при быстром остывании магм приводит к образованию сферических глобул флюидонасыщенного расплава в “сухом”. В основной массе изученных базальтов такие глобулы представлены гидратированным стеклом и имеют форму “лопнувшего пузыря” (рис. 4а). Также водосодержащие глобулы фиксируются в “сухом” железистом стекле расплавных включений в плагиоклазе толеитовых базальтов (рис. 6а–6г).

Петрологическая модель эволюции толеитовых магм щитовой постройки вулкана Ван-Тянь

На основании проведенных исследований нами предложена петрологическая модель эволюции толеитовых магм щитовой постройки вулкана Ван-Тянь. Эта модель включает в себя несколько этапов дифференциации вещества при формировании пород. К первому этапу относится фракционирование расплава по феннеровскому типу, которое обусловлено появлением на ликвидусе плагиоклаза в начале кристаллизации магм. Вследствие этого, а также низкого значения летучести кислорода происходит интенсивное накопление в расплаве FeO (до 15–17 мас. %), а также летучих компонентов, среди которых особенно выделяется P_2O_5 (до 1 мас. %). Это провоцирует расслоение ферробазальтового расплава на две несмешивающиеся жидкости – кислую и железистую, что отвечает второму этапу эволюции магм вулкана Ван-Тянь. О протекании процесса силикатной жидкостной несмесимости свидетельствует присутствие в интерстициальном пространстве изу-

ченных базальтов, а также в расплавных включениях в плагиоклазе этих пород контрастных по составу силикатных стекол. Фиксируются как “сухие”, так и гидратированные (с содержанием H_2O до 10–15 мас. %) кислые и железистые силикатные стекла.

После кристаллизации плагиоклаза и появления на ликвидусе титаномагнетита и клинопироксена остаточный расплав был в достаточной мере обогащен водой и мог разделяться на “сухие” кислые и железистые, а также гидратированные кислые и железистые силикатные несмешивающиеся жидкости.

Характерно, что весь набор фаз, образующихся в процессе эволюции толеитовых магм вулкана Ван-Тянь, – ферробазальтовых, “сухих” высокожелезистых и кислых щелочных стекол, водосодержащих железистых стекол, а также таких акцессорных минералов, как апатит и магнетит – фиксируется рядом авторов (Jiang, Chu, 2004; Chai et al., 2014; Hou et al., 2018) в апатит-магнетитовых месторождениях Кируна-типа. В связи с этим рассматриваемый нами сценарий эволюции толеитовых магм вулкана Ван-Тянь может воспроизводиться и при формировании месторождений Кируна-типа.

ВЫВОДЫ

1. В плагиоклазе толеитовых базальтов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь установлены расплавные включения, содержащие “сухое” железистое стекло или раскристаллизованный тонкозернистый минеральный агрегат, полевошпатовую кайму и глобулы различного состава – водосодержащие железистые глобулы, водосодержащие кислые глобулы и “сухие” глобулы кислого стекла. Также в интерстициальном пространстве толеитовых базальтов установлены контрастные по составу стекла – “сухие” железистые и кислые.

2. Определен состав расплавов, участвовавших в формировании толеитовых базальтов вулкана, и оценены физико-химические условия их кристаллизации. Установлено, что эти расплавы кристаллизовались при температуре 1180–1200°C.

3. При помощи математического моделирования в программе КОМАГМАТ-5.2.2 с использованием составов стекол гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе базальтов был рассчитан путь фракционной кристаллизации толеитовых расплавов. Показано, что в диапазоне 50–55 мас. % SiO_2 прослеживается феннеровский тренд фракционирования расплавов, в процессе которого при несущественных колеба-

ниях в содержании кремнекислоты расплавы значительно обогащаются железом (до 17 мас. %).

4. Выявлено, что феннеровский тип дифференциации расплавов обусловлен кристаллизацией плагиоклаза в качестве первой ликвидусной фазы, а также влиянием окислительно-восстановительного потенциала.

5. Анализ данных изучения расплавных включений в плагиоклазе толеитовых базальтов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь показал, что в формировании этих пород существенную роль играли процессы силикатной жидкостной несмесимости. Дифференцированные расплавы, существенно обогащенные FeO, расслаивались на несколько несмешивающихся жидкостей — железистых и кислых как “сухих”, так и водосодержащих.

Благодарности. Авторы признательны З.А. Котельниковой и А.Ю. Бычкову за конструктивную критику, которая способствовала улучшению статьи.

Источники финансирования. Работа выполнена в лаборатории редкометального магматизма при финансовой поддержке Программы НИР № 0136-2018-0026 “Мантийно-коровое взаимодействие в областях анорогенного магматизма и его роль в формировании редкометальных магм (на примере Центрально-Азиатского складчатого пояса)” (рук. В.В. Ярмолюк). Изучение расплавных включений с использованием электронного и ионного зонда поддержаны грантами РФФИ № 20-05-00306 и Президента Российской Федерации МК-2419.2019.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Андреева И.А. и др.* Состав и источники магм вулкана Чанбайшань Тяньчи (Китай—Северная Корея) // Докл. АН. 2014. Т. 456. № 2. С. 200—206.
- Андреева О.А., Андреева И.А., Ярмолюк В.В. и др.* Эволюция расплавов вулкана Чанбайшань Тяньчи (Китай—Северная Корея) как модель формирования редкометальной рудно-магматической системы: по данным изучения расплавных включений // Докл. АН. 2016. Т. 466. № 3. С. 324—330.
- Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Андреева И.А., Борисовский С.Е.* Магматическая эволюция вулкана Чанбайшань Тяньчи (Китай—Северная Корея) по данным изучения расплавных и флюидных включений // Петрология. 2018. Т. 26. №5. С. 535—566.
- Бабанский А.Д., Рябчиков И.Д., Богатилов О.А.* Эволюция щелочно-земельных магм. М.: Наука, 1983. 96 с.
- Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В.* Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов. М.: Наука, 1986. 158 с.
- Кадик А.А., Луканин О.А., Лапин И.В.* Физико-химические условия эволюции базальтовых магм в приповерхностных очагах. М.: Наука, 1990. 346 с.
- Куплетский Б.М.* Палагонитовые базальты Тиммана // Тр. Ин-та геологических наук АН СССР. 1940. Вып. 25. Сер. 8. С. 7—22.
- Лапин И.В., Луканин О.А., Кадик А.А.* Влияние окислительно-восстановительного режима на кристаллизацию и дифференциацию базальтов Исландии в приповерхностных условиях // Геохимия. 1985. № 6. С. 747—760.
- Луканин О.А.* О причинах бимодального распределения пород вулканических серий // Геохимия. 1985. № 3. С. 348—359.
- Перетяжко И.С., Савина Е.А.* Силикатно-железистая жидкостная несмесимость в риолитовой магме // Докл. АН. 2014. Т. 457. № 6. С. 704—709.
- Рябов В.В.* Ликвация в природных стеклах на примере траппов. Новосибирск: Наука СО, 1989. 224 с.
- Сазонова З.А.* Петрография базальтов Чешской губы // Тр. Петрографического ин-та АН СССР. 1938. Вып. 12. С. 107—154.
- Сахно В.Г.* Новейший и современный вулканизм юга Дальнего Востока (позднеплейстоцен—голоценовый этап). Владивосток: Дальнаука, 2008. 128 с.
- Соболев А.В.* Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология. 1996. Т. 4. № 3. С. 228—239.
- Уэйнджер Л., Браун Г.* Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 1970. 552 с.
- Ariskin A.A., Bychkov K.A., Nikolaev G.S., Barmina G.S.* The COMAGMAT-5: Modeling the effect of Fe-Ni sulfide immiscibility in crystallizing magmas and cumulates // J. Petrol. 2018. V. 59. № 2. P. 283—298.
- Ballhaus C., Fonseca R.O.C., Münker K. et al.* Spheroidal textures in igneous rocks — textural consequences of H₂O saturation in basaltic melts // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 167. P. 241—252.
- Brooks C.K., Nielsen T.F.D.* Early stages in the differentiation of the Skaergaard magma as revealed by a closely related suite of dike rocks // Lithos. 1978. V. 11. P. 1—14.
- Carmichael I.S.E.* The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in Eastern Iceland // J. Petrol. 1964. V. 5. P. 435—460.
- Chai F., Yang F., Liu F. et al.* The Abagong apatite-rich magnetite deposit in the Chinese Altay Orogenic Belt: A Kiruna-type iron deposit // Ore Geol. Rev. 2014. V. 57. P. 482—497.
- Charlier B., Grove T.L.* Experiments on liquid immiscibility along tholeiitic liquid lines of descent // Contrib. Mineral. Petrol. 2012. V. 164. P. 27—44.
- Charlier B., Namur O., Toplis M.J. et al.* Large-scale silicate liquid immiscibility during differentiation of tholeiitic ba-

- salt to granite and the origin of the Daly gap // *Geology*. 2011. V. 39. P. 907–910.
- Duchesne J.C.* Fe-Ti deposits in Rogaland anorthosites (South Norway): geochemical characteristics and problems of interpretation // *Mineral. Deposita*. 1999. V. 34. P. 182–198.
- Dixon S., Rutherford M.J.* Plagiogranites as late-stage immiscible liquids in ophiolite and mid-ocean ridge suites: an experimental study // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1979. V. 45. P. 45–60.
- Eggler D.H., Osborn E.F.* Experimental studies of the system $MgO-FeO-Fe_2O_3-NaAlSi_3O_8-CaAl_2Si_2O_8-SiO_2$ – a model for subalkaline magmas // *Amer. J. Sci.* 1982. V. 282. P. 1012–1041.
- Fan Q.C., Liu R.X., Zhang G.H. et al.* The genesis and evolution of bimodal volcanic rocks in Wangtian'e volcano, Changbaishan (in Chinese) // *Acta Petrol. Sinica*. 1998. V. 14. P. 305–317.
- Fan Q., Liu R., Li D., Li Q.* Significance of K-Ar age of bimodal volcanic rocks at Wangtian'e volcano, Changbaishan area // *Chinese Sci. Bull.* 1999. V. 44. № 7. P. 660–663.
- Fan Q., Sui J.L., Wang T.H. et al.* History of volcanic activity, magma evolution and eruptive mechanisms of the Changbai volcanic province // *Geol. J. China Universities*. 2007. № 13. P. 175–190.
- Fischer L.A., Wang M., Charlier B. et al.* Immiscible iron- and silica-rich liquids in the upper zone of the Bushveld Complex // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016. V. 443. P. 108–117.
- Ghiorso M.S., Carmichael I.S.E.* Modeling magmatic systems; petrologic applications // *Rev. Mineral. Geochem.* 1987. V. 17. P. 467–499.
- Ghiorso M.S., Evans B.W.* Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide geothermometer and oxygen-barometer // *Amer. J. Sci.* 2008. V. 308. P. 957–1039.
- Higgins M.D.* A new model for the structure of the Sept Iles Intrusive suite, Canada // *Lithos*. 2005. V. 83. P. 199–213.
- Holness M.B., Stripp G., Humphreys M.C.S. et al.* Silicate Liquid immiscibility within the Crystal Mush: late-stage magmatic microstructures in the Skaergaard intrusion, East Greenland // *J. Petrol.* 2011. V. 52. P. 175–222.
- Hou T., Veksler I.V.* Letter. Experimental confirmation of high-temperature silicate liquid immiscibility in multicomponent ferrobaltic systems // *Amer. Mineral.* 2015. V. 100. P. 1304–1307.
- Hou T., Charlier B., Holtz F. et al.* Immiscible hydrous Fe-Ca-P melt and the origin of iron oxide-apatite ore deposits // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. Article number: 1415. P. 1–8.
- Hunter R.H., Sparks R.S.J.* The differentiation of the Skaergaard intrusion // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987. V. 95. P. 451–461.
- Irvine T.N., Baragar W.R.A.* A guide to chemical classification of the common volcanic rocks // *Canad. J. Earth Sci.* 1971. V. 8. P. 523–548.
- Irvine T.N., Andersen J. C., Brooks C.K.* Included blocks (and blocks within blocks) in the Skaergaard intrusion: geological relations and the origins of rhythmic modally graded layers // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1998. V. 110. P. 1398–1447.
- Jakobsen J.K., Veksler I.V., Tegner C., Brooks C.K.* Crystallization of the Skaergaard intrusion from an emulsion of immiscible iron- and silica-rich liquids: evidence from melt inclusions in plagioclase // *J. Petrol.* 2011. V. 52. P. 345–373.
- Jiang N., Chu X.* A magnetite-apatite deposit in the Fanshan alkaline ultramafic complex, Northern China // *Econom. Geol.* 2004. V. 99. P. 397–408.
- Kamenetsky V.S., Charlier B., Zhitova L. et al.* Magma chamber-scale liquid immiscibility in the Siberian Traps represented by melt pools in native iron // *Geology*. 2013. V. 41. № 10. P. 1091–1094.
- Kolker A.* Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis // *Econom. Geol.* 1982. V. 77. P. 1146–1158.
- Kuno H.* Fractionation trends of basalt magmas in lava flows // *J. Petrol.* 1965. V. 6. P. 302–321.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B.* A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // *J. Petrol.* 1986. V. 27. P. 745–750.
- Liu J., Chen Sh.-Sh., Guo Zh. et al.* Geological background and geodynamic mechanism of Mt. Changbai volcanoes on the China-Korea border // *Lithos*. 2015. V. 236–237. P. 46–73.
- McBirney A.R., Nakamura Y.* Immiscibility in late-stage magmas of the Skaergaard intrusion // *Carnegie Institution of Washington Yearbook*. 1974. V. 73. P. 348–352.
- McBirney A.R., Naslund H.R.* The differentiation of the Skaergaard intrusion. A discussion of Hunter and Sparks (Contrib. Mineral. Petrol. V. 95. P. 451–461) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1990. V. 104. P. 235–240.
- Morse S.A.* Kiglapait geochemistry IV: the major elements // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1981. V. 45. P. 461–479.
- Mysen B.* Water-melt interaction in hydrous magmatic systems at high temperature and pressure // *Progress in Earth Planet. Sci.* 2014. V. 1. P. 4.
- Naslund H.R.* The effect of oxygen fugacity on liquid immiscibility in iron-bearing silicate melts // *Amer. J. Sci.* 1983. V. 283. P. 1034–1059.
- Naslund H.R.* Petrology of the Upper Border series of the Skaergaard intrusion // *J. Petrol.* 1984. V. 25. P. 185–212.
- Osborn E.F.* Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma // *Amer. J. Sci.* 1959. V. 257. P. 609–647.
- Philpotts A.R.* Textural evidence for liquid immiscibility in tholeiites // *Mineral. Mag.* 1978. V. 42. P. 113–127.
- Philpotts A.R.* Liquid immiscibility in silicate melt inclusions in plagioclase phenocrysts // *Soc. Fr. Mineral. Cristallogr. Bull.* 1981. V. 104. P. 1–8.

- Philpotts A.R.* Compositions of immiscible liquids in volcanic rocks // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1982. V. 80. P. 201–218.
- Presnall D.C.* The join forsterite-diopside-iron oxide and its bearing on the crystallization of basaltic and ultramafic magmas // *Amer. J. Sci.* 1966. V. 264. P. 753–809.
- Roedder E.* Low-temperature liquid immiscibility in the system $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2$ // *Amer. Mineral.* 1951. V. 36. P. 282–286.
- Roedder E.* Silicate liquid immiscibility in magmas and in the system $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2$: an example of serendipity // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1978. V. 43. P. 1597–1617.
- Roedder E., Weiblen P.W.* Lunar petrology of silicate melt inclusions, Apollo 11 rocks // *Apollo 11 Lunar Sci. Conf. Proc: Geochim. Cosmochim. Acta.* 1970. P. 801–837.
- Sensarma S., Palme H.* Silicate liquid immiscibility in the ~2.5 Ga Fe-rich andesite at the top of the Dongargarh large igneous province (India) // *Lithos.* 2013. V. 170–171. P. 239–251.
- Sisson T.W., Ratajeski K., Hankins W.B., Glazner A.F.* Voluminous granitic magmas from common basaltic sources // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2005. V. 148. P. 635–61.
- Snyder D., Carmichael I.S.E., Wiebe R.A.* Experimental study of liquid evolution in a Fe-rich, layered mafic intrusion: constraints of the Fe-Ti oxide precipitation on the $T-fO_2$ and $T-r$ paths of tholeiitic magmas // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1993. V. 113. P. 73–86.
- Toplis M.J., Carroll M.R.* An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems // *J. Petrol.* 1995. V. 36. P. 1137–1170.
- Veksler I.V., Dorfman A.M., Borisov A.A. et al.* Liquid immiscibility and the evolution of basaltic magma // *J. Petrol.* 2007. V. 48. P. 2187–2210.
- Veksler I.V., Dorfman A.M., Borisov A.A. et al.* Liquid Immiscibility and evolution of basaltic magma: Reply to S.A. Morse, A.R. McBirney and A.R. Philpotts // *J. Petrol.* 2008. V. 49. P. 2177–2186.
- Velasco F., Tornos F., Hanchar J.M.* Immiscible iron- and silica-rich melts and magnetite geochemistry at the El Laco volcano (northern Chile): Evidence for a magmatic origin for the magnetite deposits // *Ore Geol. Rev.* 2016. V. 79. P. 346–366.
- Visser W., Koster van Groos A.F.* Liquid immiscibility in $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2$ // *Nature.* 1976. 264. P. 426–427.

Silicate Liquid Immiscibility as a Result of Fenner-Type Crystal Fractionation of Wangtian'e Tholeiitic Melts (Northeast China)

O. A. Andreeva¹, I. A. Andreeva¹, V. V. Yarmolyuk¹,
Ji Jianqing², Zhou Xin², and S. E. Borisovsky¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Peking, China*

The results of a mineral-hosted melt inclusion study were used to reconstruct the evolution of tholeiitic melts that produced rocks of the shield edifice of Wangtian'e volcano (Northeast China) including P - T parameters of their crystallization. Primary melt inclusions were studied in plagioclase of tholeiitic basalts. They contain “dry” Fe-rich silicate glass or crystallized fine-grained mineral aggregate, feldspar rim, and globules of various compositions: water-bearing Fe-rich globules, water-bearing Si-rich globules and “dry” Si-rich globules. In the groundmass of tholeiitic basalts “dry” Si-rich and Fe-rich glasses, as well as hydrated Fe-rich glass with an H_2O content of up to 10–15 wt.% were identified. The fractional crystallization path of Wangtian'e tholeiitic melts was calculated by the COMAGMAT-5.2.2 program using glass compositions of homogenized melt inclusions in plagioclase from basalts. It was shown that the calculated temperatures of plagioclase crystallization beginning are in good agreement with temperatures obtained during thermometric experiments with melt inclusions in plagioclase, and correspond to 1180–1200°C. Based on our studies, several stages of the melt differentiation during the formation of Wangtian'e volcanic rocks we identified. The first stage includes the Fenner-type crystal fractionation of the melt due to the appearance of plagioclase on the liquidus at the beginning of magma crystallization. The separation of the ferrobasaltic melt into Si-rich and Fe-rich silicate immiscible liquids (“dry” and hydrated) corresponds to the second stage of differentiation. The occurrence of silicate liquid immiscibility is evidenced by the presence of Fe-rich and Si-rich glasses in the interstitial space of the basalts and in the melt inclusions in plagioclase of these rocks.

Keywords: intraplate magmatism, melt inclusions, tholeiitic magma evolution, Fenner-type crystal fraction, silicate liquid immiscibility