

УДК 548.4

## ФОРМИРОВАНИЕ ТРАХИТОВ НЕККА ВУЛКАНА ВАН-ТЯНЬ ЧАНБАЙШАНЬСКОГО АРЕАЛА (СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ КИТАЙ) КАК РЕЗУЛЬТАТ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ТОЛЕИТОВОЙ БАЗАЛЬТОВОЙ МАГМЫ

© 2023 г. О. А. Андреева<sup>1,\*</sup>, И. А. Андреева<sup>1</sup>, А. И. Усольцева<sup>2</sup>, академик РАН В. В. Ярмолук<sup>1</sup>,  
Е. В. Ковальчук<sup>1</sup>, А. А. Аверин<sup>3</sup>, J.-Q. Ji<sup>4</sup>, X. Zhou<sup>4</sup>

Поступило 28.08.2023 г.  
После доработки 30.08.2023 г.  
Принято к публикации 30.08.2023 г.

Изучены толеитовые базальты и трахиты бимодальной ассоциации вулкана Ван-Тянь. Показано, что трахиты формировались при ведущей роли кристаллизационной дифференциации исходной толеитовой магмы. На основе метода изучения включений минералообразующих сред определено, что фенокристы геденбергита трахитов нека вулкана Ван-Тянь кристаллизовались в температурном интервале 1080–1100°C, а фенокристы плагиоклаза — при температурах 1050–1060°C. После термометрических экспериментов с расплавленными включениями в плагиоклазе трахитов в ряде случаев во включениях наблюдались реликты карбонатов и углекислота. Во вкрапленниках трахитов обнаружены водосодержащие железистые глобулы и включения CO<sub>2</sub>, содержащие карбонатные фазы. Железистые силикатные глобулы зачастую находятся в сростании с титаномагнетитом и покрыты пленками аморфного углерода. Предложена модель, объясняющая появление водосодержащих железистых глобул и включений углекислоты с реликтами карбонатов в результате силикатно-силикатной и силикатно-карбонатной ликвации, которые были вызваны эволюцией исходного базальтового расплава. При подъеме трахитового расплава к поверхности феррокарбонатная жидкость разлагалась на магнетит, углерод и углекислоту.

**Ключевые слова:** кайнозойский вулканизм, бимодальный магматизм, трахиты, кристаллизационная дифференциация, силикатно-силикатная жидкостная несмесимость, силикатно-карбонатная жидкостная несмесимость, расплавленные включения, флюидные включения

**DOI:** 10.31857/S2686739723601850, **EDN:** XOLAKF

### ВВЕДЕНИЕ

Проявления внутриплитного вулканизма характеризуются, как правило, трещинными излияниями толеитовых и щелочных базальтовых лав [1–3], образующих плато-базальты, потоки, покровы, а также щитовые вулканы. Иногда излия-

ния толеитовых лав чередуются с извержениями щелочных базальтов, как, например, в случае формирования Гавайских островов [4, 5]. Трахиты и более дифференцированные щелочно-салические породы, находящиеся в ассоциации с толеитовыми базальтами, редки [4, 6–10]. Вопрос об их происхождении до сих пор остается дискуссионным. Их появление объясняется фракционной кристаллизацией щелочных [8, 11], в меньшей степени — толеитовых [6, 12] базальтовых расплавов в приповерхностных магматических камерах, либо процессами мантийно-корового взаимодействия [11, 13].

В этой работе на основе данных изучения включений минералообразующих сред выявлены процессы, приводящие к формированию трахитов нека на северо-восточном склоне вулканической постройки вулкана Ван-Тянь, сложенной, главным образом, толеитовыми базальтами.

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>4</sup>School of Earth and Space Sciences, Peking University, Peking, China

\*E-mail: oandreeva@igem.ru

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВУЛКАНА ВАН-ТЯНЬ

Чанбайшаньский ареал представляет собой крупный вулканический центр в составе позднекайнозойской внутриплитной провинции Центральной и Восточной Азии, сложенной преимущественно продуктами трещинных излияний базальтовых лав повышенной щелочности [3]. Чанбайшаньский ареал выделяется на фоне других вулканических комплексов провинции тем, что он сложен контрастными по составу породами — от базальтов до риолитов, при этом базальты ареала относятся к разным петрохимическим сериям — толеитовой и щелочной [10]. Наиболее ярко эти различия выражены в строении двух рядом расположенных вулканов Чанбайшань (Китай—Северная Корея) и Ван-Тянь (Китай), сформировавшихся с незначительным разрывом во времени в течение последних 4 млн лет (рис. 1). В то время, как продукты вулкана Чанбайшань демонстрируют глубоко дифференцированную серию щелочных пород от трахибазальтов до комендитов и пантеллеритов [7, 14], породы вулкана Ван-Тянь представлены слабо дифференцированными толеитовыми базальтоидами, а также ассоциирующими с ними трахитами и риолитами [7, 9, 10, 15].

Согласно результатам К—Аг-геохронологических исследований [10], история становления вулкана Ван-Тянь включает три главных эпизода: 1) этап Чанбай, характеризующийся трещинными излияниями толеитовых лав ( $3.82 \pm 0.13$ – $2.83 \pm 0.09$  млн лет); 2) этап Ван-Тянь, в течение которого сформировался конус, сложенный потоками толеитовых базальтоидов ( $2.76 \pm 0.09$ – $2.67 \pm 0.20$  млн лет); 3) этап Хонгтоушань, которому соответствует возникновение на склонах вулканического конуса трахит-щелочно-риолитовых экструзий, представленных некками и куполом ( $2.76 \pm 0.07$ – $2.69 \pm 0.07$  млн лет) (рис. 1).

## ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ И ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

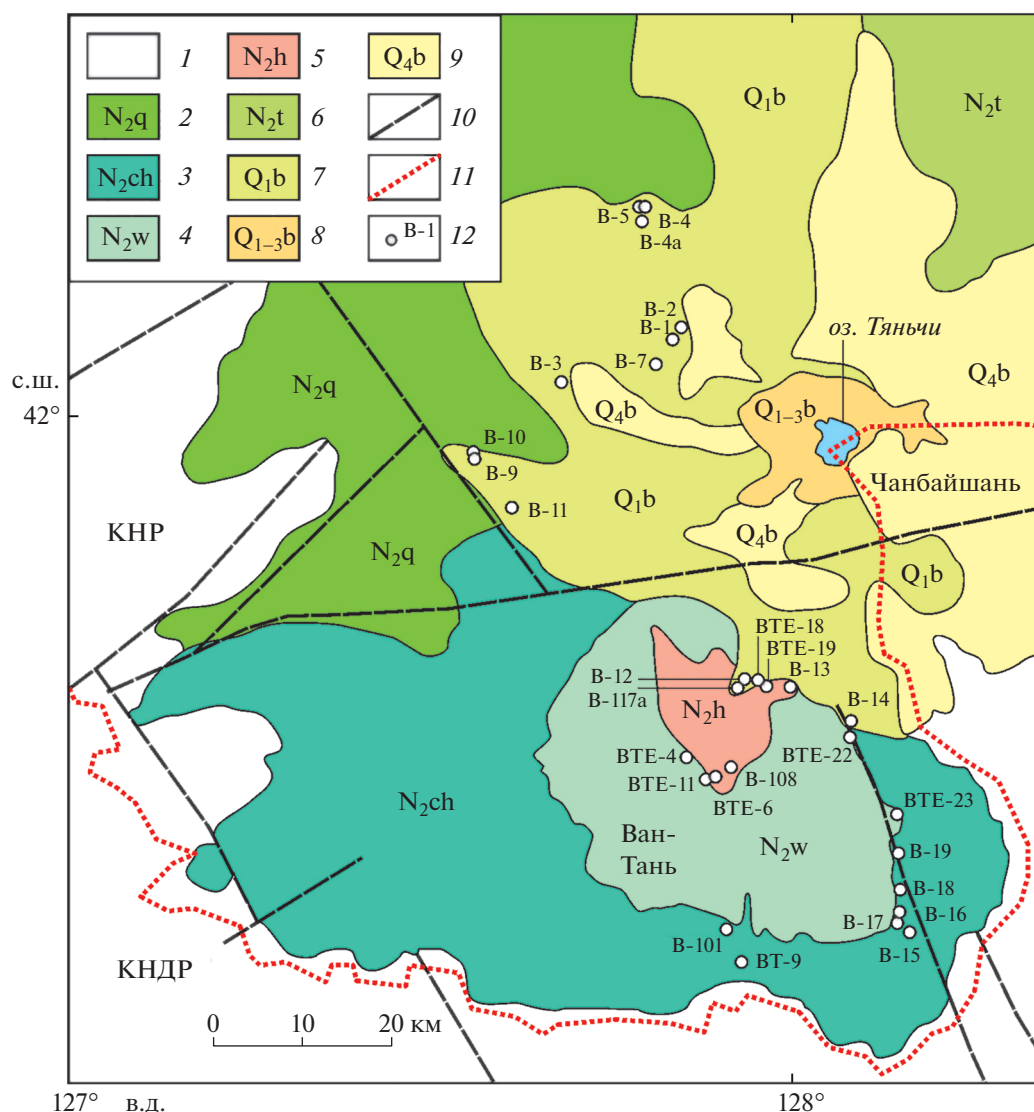
Нами изучены разрезы северного, южного и восточного склонов конуса вулкана Ван-Тянь, его некки, сформировавшиеся в течение этапа Хонгтоушань, а также щитовая постройка этапа Чанбай. По составу породы вулкана Ван-Тянь соответствуют базальтам и трахитам. Базальты, слогающие щитовую платформу и конус вулкана, отвечают толеитам и характеризуются высокими концентрациями железа ( $9.6$ – $15.1$  мас. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), титана ( $2.4$ – $3.6$  мас. %  $\text{TiO}_2$ ), фосфора ( $\text{P}_2\text{O}_5$  — до  $0.7$  мас. %) и низкими концентрациями магния ( $2.4$ – $4.1$  мас. %  $\text{MgO}$ ) при вариациях содержаний  $\text{SiO}_2$   $48.7$ – $51.2$  мас. % [10]. Содержания щелочей в них в сумме варьируют от  $4.3$  до  $5.5$  мас. %.

Как было показано [10], толеитовые базальты щита и конуса вулкана Ван-Тянь представляют собой порфировые породы с крупными фенокристами плагиоклаза ( $\text{An}_{74.3-79.0}\text{Ab}_{20.0-25.5}\text{Or}_{0.2-1.3}$ ). Среди минералов основной массы установлены железистый оливин ( $\text{Fo} = 43.2$ – $56.4$ ), клинопироксен, представленный титанавгитом ( $\#\text{Mg} = 0.64$ – $0.70$ ), ильменит, титаномагнетит и фторапатит [9, 10].

Кислые породы в строении вулкана редки и связаны только с некками и экструзивным куполом Хонгтоушань. Собранный нами коллекция кислых пород представлена трахитами, имеющими широкое поле составов: концентрации ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) в них варьируют в интервале  $7.5$ – $8.9$  мас. % с преобладанием  $\text{Na}_2\text{O}$  над  $\text{K}_2\text{O}$  при диапазоне содержаний  $\text{SiO}_2$   $61.5$ – $68.5$  мас. %. Для трахитов характерны высокие содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , которые уменьшаются при увеличении кремнекислотности от  $9.2$  до  $5.4$  мас. %, так же, как содержания  $\text{TiO}_2$  — от  $1.3$  до  $0.4$  мас. % и  $\text{P}_2\text{O}_5$  — от  $0.5$  до  $0.06$  мас. % (табл. 1).

Все изученные трахиты вулкана Ван-Тянь имеют схожие петрографические характеристики. Они представляют собой порфировидные породы, содержащие до  $35\%$  вкрапленников плагиоклаза, субфенокристов оливина ( $\text{Fo} = 20.1$ – $25.9$ ) и клинопироксена, представленного геденбергитом. Вкрапленники плагиоклаза характеризуются, как правило, средним составом ( $\text{An}_{44.2-49.8}\text{Ab}_{45.8-51.0}\text{Or}_{3.7-4.8}$ ). При этом зональность в зернах плагиоклаза отсутствует. Часто субфенокристы оливина ( $\text{Fo} = 20.1$ – $25.9$ ) и геденбергита образуют минеральные сегрегации с рудными минералами, апатитом и железистым силикатным стеклом, для которого характерно до  $25$ – $30$  мас. %  $\text{FeO}$ ,  $4$ – $5$  мас. %  $\text{MgO}$ , до  $1.5$ – $2$  мас. %  $\text{CaO}$ , до  $4$  мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и не более  $0.5$  мас. % ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) при содержании  $\text{SiO}_2$   $42$ – $45$  мас. % (табл. 2). Основная масса трахитов сложена микролитами плагиоклаза и полевого шпата, кварцем, апатитом, ильменитом, титаномагнетитом и пирротинном, а также стеклом трахитового состава. Стекло основной массы имеет трахитовый состав и характеризуется высокими концентрациями щелочей, в сумме достигающими  $11$ – $12$  мас. %,  $\text{FeO}$  — до  $3.6$  мас. %,  $\text{TiO}_2$  — до  $0.2$  мас. % при содержании  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $15$ – $16$  мас. % и  $\text{SiO}_2$   $66$ – $68$  мас. %.

В геохимическом отношении толеитовые базальты представляют собой слабодифференцированную группу пород со схожими спектрами распределения элементов-примесей (табл. 1, рис. 2). Для них характерны низкие содержания РЗЭ с некоторым преобладанием легких редкоземельных элементов над тяжелыми ( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 7$ – $9$ ). Для всех толеитовых базальтоидов фиксируется слабо проявленная положительная Eu-аномалия ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1$ – $1.1$ ). Они обогащены Ва (до  $570$  ppm),



**Рис. 1.** Геологическая схема строения вулканов Ван-Тянь и Чанбайшань Чанбайшаньского ареала [12]: 1 – вмещающие породы; 2 – плато-базальты ареала Чанбайшань, этап Куанянь (4.50–4.00 млн лет); 3 – толеитовые базальты щитовой постройки вулкана Ван-Тянь, этап Чанбай (3.82–2.83 млн лет); 4 – толеитовые базальты конуса вулкана Ван-Тянь, этап Ван-Тянь (2.76–2.67 млн лет); 5 – купол и некки вулкана Ван-Тянь, этап Хонгтоушань (2.76–2.69 млн лет); 6 – щелочные базальтоиды щитовой постройки вулкана Чанбайшань, этап Тоудао (2.77–1.99 млн лет); 7 – щелочные базальтоиды щитовой постройки вулкана Чанбайшань, этап Байшань (1.64–1.11 млн лет); 8 – трахиты, комендаты и пантеллериты конуса вулкана Чанбайшань, этап Байтоушань (1.12–0.81 млн лет); 9 – игнимбриты, пемзы и пеплы кальдеры вулкана Чанбайшань, этапы Биньчань-Байюфень-Байгуамяо (7854–825 лет до н.э.); 10 – разломы; 11 – государственная граница; 12 – точки отбора образцов и их номера.

Pb и обеднены U (рис. 2). В целом характер распределения элементов-примесей сопоставим с таковым для базальтов океанических островов (рис. 2), отличаясь от последнего повышенными концентрациями Ba (до 570 ppm) и Pb (до 9 ppm), а также пониженными содержаниями Th, U, Nb и Ta (рис. 2, табл. 1).

Трахиты некков имеют согласованные спектры распределения элементов-примесей, которые по сравнению с базальтами характеризуются более высокими содержаниями большинства не-

совместимых элементов (табл. 1, рис. 2). Для них характерна слабо проявленная отрицательная Eu-аномалия ( $Eu/Eu^* = 0.7–0.9$ ) и ярко выраженный Sr-минимум. Все они обогащены редкоземельными элементами, с преобладанием легких над тяжелыми ( $(La/Yb)_N = 6–8$ ).

#### ВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СРЕД ВО ВКРАПЛЕННИКАХ ТРАХИТОВ

*Флюидные и расплавные включения.* В плагиоклазе трахитов (обр. В-13) нами выявлены газо-

**Таблица 1.** Химический (мас. %) и микроэлементный (ppm) состав представительных пород вулканов Ван-Тянь

| Компонент                            | Вулкан Ван-Тянь |       |        |        |       |       |       |        |
|--------------------------------------|-----------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
|                                      | 1               |       | 2      |        | 3     |       |       |        |
|                                      | В-15            | В-19  | ВТЕ-11 | ВТЕ-22 | В-13  | В-108 | ВТЕ-6 | ВТЕ-19 |
| SiO <sub>2</sub>                     | 48.66           | 48.66 | 50.88  | 48.92  | 64.49 | 68.47 | 62.26 | 64.03  |
| TiO <sub>2</sub>                     | 3.30            | 2.44  | 3.59   | 3.56   | 0.90  | 0.41  | 1.21  | 0.88   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 15.80           | 18.51 | 13.09  | 14.66  | 14.06 | 13.88 | 14.06 | 13.90  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 13.14           | 9.62  | 15.13  | 14.49  | 6.77  | 5.44  | 8.14  | 7.29   |
| MnO                                  | 0.17            | 0.13  | 0.180  | 0.174  | 0.12  | 0.101 | 0.129 | 0.110  |
| MgO                                  | 2.74            | 2.98  | 3.57   | 3.80   | 0.58  | 0.07  | 1.02  | 0.59   |
| CaO                                  | 8.17            | 9.62  | 7.09   | 8.07   | 2.40  | 1.24  | 3.15  | 2.31   |
| Na <sub>2</sub> O                    | 3.68            | 3.17  | 3.38   | 3.51   | 4.48  | 4.53  | 4.61  | 4.50   |
| K <sub>2</sub> O                     | 1.54            | 1.09  | 1.83   | 1.33   | 3.86  | 4.71  | 3.40  | 3.79   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>        | 0.71            | 0.36  | 0.63   | 0.66   | 0.22  | 0.06  | 0.41  | 0.24   |
| Сумма                                | 97.91           | 96.58 | 99.37  | 99.17  | 97.88 | 98.91 | 98.39 | 97.64  |
| ППП                                  | 1.26            | 2.66  | 0.34   | 0.55   | 1.27  | 0.69  | 1.27  | 2.03   |
| Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O | 5.22            | 4.26  | 5.21   | 4.84   | 8.34  | 9.24  | 8.01  | 8.29   |
| V                                    | 168             | 154   | 197    | 191    | 3.7   | 3.0   | 16.9  | 3.2    |
| Cr                                   | 27.0            | 38.8  | 6.1    | 6.9    | 5.9   | 15.0  | 5.0   | 6.9    |
| Co                                   | 31.9            | 30.7  | 34.3   | 33.6   | 3.1   | 1.1   | 7.1   | 3.9    |
| Ni                                   | 19.4            | 42.2  | 5.8    | 13.5   | 1.6   | 4.9   | 4.7   | 5.3    |
| Cu                                   | 27.7            | 18.1  | 57.1   | 53.6   | 5.0   | 18.6  | 49.6  | 23.3   |
| Zn                                   | 124             | 84.4  | 147    | 148    | 137   | 116   | 134   | 131    |
| Ga                                   | 22.2            | 20.4  | 23.1   | 22.7   | 24.1  | 25.6  | 22.7  | 26.0   |
| Rb                                   | 28.4            | 16.5  | 30.8   | 13.2   | 70.5  | 121.7 | 65.3  | 79.6   |
| Sr                                   | 545             | 650   | 399    | 451    | 224   | 130   | 278   | 239    |
| Y                                    | 35.4            | 18.9  | 30.1   | 30.5   | 48.0  | 60.3  | 38.7  | 47.4   |
| Zr                                   | 206             | 151   | 222    | 204    | 537   | 575   | 398   | 484    |
| Nb                                   | 22.3            | 16.8  | 23.6   | 22.9   | 46.9  | 62.6  | 39.0  | 48.2   |
| Cs                                   | 0.3             | 0.2   | 0.3    | 0.2    | 0.9   | 2.6   | 0.7   | 0.7    |
| Ba                                   | 546             | 359   | 479    | 508    | 1033  | 1312  | 822   | 939    |
| La                                   | 27.2            | 15.9  | 26.2   | 25.2   | 39.9  | 61    | 41.9  | 47.9   |
| Ce                                   | 64.8            | 38.2  | 53.0   | 57.0   | 90.5  | 125   | 86.3  | 97.9   |
| Pr                                   | 9.0             | 4.9   | 7.7    | 7.7    | 12.2  | 16    | 10.6  | 12.5   |
| Nd                                   | 43.0            | 22.6  | 33.0   | 36.0   | 53.5  | 65    | 45.7  | 53.1   |
| Sm                                   | 10.5            | 5.6   | 7.9    | 10.0   | 12.7  | 15    | 11.8  | 13.7   |
| Eu                                   | 3.7             | 2.0   | 2.8    | 3.2    | 3.3   | 3.7   | 3.3   | 3.2    |
| Gd                                   | 10.3            | 5.5   | 8.0    | 9.0    | 12.4  | 13.5  | 10.0  | 11.7   |
| Tb                                   | 1.4             | 0.8   | 1.1    | 1.2    | 1.9   | 2.1   | 1.4   | 1.7    |
| Dy                                   | 7.3             | 4.1   | 6.2    | 6.7    | 10.3  | 12.3  | 8.1   | 10.3   |
| Ho                                   | 1.3             | 0.7   | 1.1    | 1.3    | 1.9   | 2.2   | 1.5   | 1.8    |
| Er                                   | 3.4             | 1.9   | 2.9    | 3.0    | 5.4   | 5.8   | 4.2   | 5.0    |
| Tm                                   | 0.4             | 0.2   | 0.4    | 0.4    | 0.7   | 0.8   | 0.6   | 0.7    |
| Yb                                   | 2.5             | 1.4   | 2.3    | 2.4    | 4.5   | 5.1   | 3.5   | 4.3    |
| Lu                                   | 0.3             | 0.2   | 0.3    | 0.4    | 0.7   | 0.7   | 0.4   | 0.6    |
| Hf                                   | 5.7             | 4.1   | 5.6    | 5.5    | 15.2  | 14.2  | 10.4  | 12.1   |
| Ta                                   | 1.5             | 1.1   | 1.4    | 1.5    | 3.1   | 3.7   | 2.1   | 2.7    |
| Pb                                   | 4.9             | 3.5   | 4.2    | 6.9    | 13.1  | 16.8  | 9.9   | 13.5   |
| Th                                   | 2.4             | 1.7   | 2.6    | 2.5    | 7.8   | 10.4  | 6.1   | 7.7    |
| U                                    | 0.5             | 0.3   | 0.5    | 0.4    | 1.4   | 2.2   | 1.2   | 1.4    |

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – железо общее. 1 – толеитовые базальты щитовой постройки вулкана Ван-Тянь (этап Чанбай); 2 – толеитовые базальты конуса вулкана Ван-Тянь (этап Ван-Тянь); 3 – трахиты некков вулкана Ван-Тянь (этап Хонгтоушань) ППП – потери при прокаливании.

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) стекол гомогенизированных расплавных включений и водосодержащих железистых глобул в плагиоклазе трахита вулкана Ван-Тянь

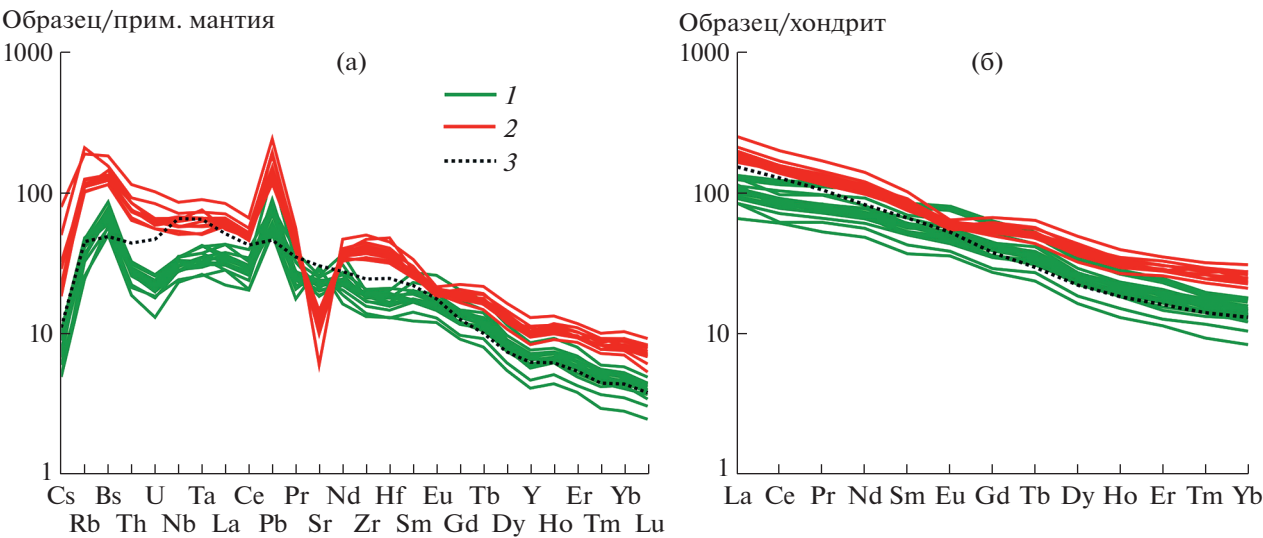
| Компонент                      | 1      | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|--------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 64.80  | 67.45  | 65.94 | 64.39 | 66.93 | 66.00 | 63.85 | 42.75 | 59.09 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.71   | 0.76   | 0.63  | 0.96  | 0.63  | 0.63  | 0.74  | 0.94  | 0.07  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.57  | 15.51  | 15.22 | 15.82 | 15.67 | 14.02 | 14.41 | 5.31  | 24.89 |
| FeO                            | 5.99   | 5.42   | 4.46  | 5.83  | 3.98  | 6.05  | 7.03  | 28.05 | 0.42  |
| MnO                            | 0.15   | 0.14   | 0.07  | 0.18  | 0.13  | 0.16  | 0.20  | 0.88  | 0.02  |
| MgO                            | 0.85   | 0.54   | 0.32  | 0.45  | 0.25  | 0.44  | 0.48  | 2.23  | 0.04  |
| CaO                            | 2.82   | 2.50   | 2.68  | 3.38  | 2.73  | 2.11  | 2.50  | 4.62  | 7.37  |
| Na <sub>2</sub> O              | 4.65   | 4.22   | 4.24  | 4.10  | 4.11  | 3.86  | 4.22  | 0.28  | 7.09  |
| K <sub>2</sub> O               | 3.19   | 3.67   | 3.66  | 2.91  | 3.48  | 3.76  | 3.59  | 0.98  | 0.76  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.12   | 0.22   | 0.09  | 0.29  | 0.11  | 0.07  | 0.12  | 0.08  | —     |
| SO <sub>3</sub>                | <по    | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | <по   | 0.02  | —     |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.05   | 0.05   | <по   | 0.11  | 0.03  | 0.02  | 0.10  | 0.07  | —     |
| Cl                             | 0.01   | 0.02   | 0.02  | 0.06  | 0.05  | 0.03  | 0.03  | 0.04  | —     |
| F                              | 0.05   | <по    | <по   | 0.19  | 0.06  | 0.04  | 0.14  | 0.24  | —     |
| Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.08   | 0.06   | 0.11  | 0.07  | 0.03  | 0.05  | 0.06  | 0.07  | —     |
| Сумма                          | 100.02 | 100.55 | 97.45 | 98.66 | 98.15 | 97.21 | 97.40 | 86.45 | 99.74 |

FeO — железо общее. Прочерк — содержание не определяли. <по — ниже предела обнаружения. 1–7 — стекла гомогенизированных расплавных включений; 8 — водосодержащая железистая глобула; 9 — плагиоклаз-хозяин.

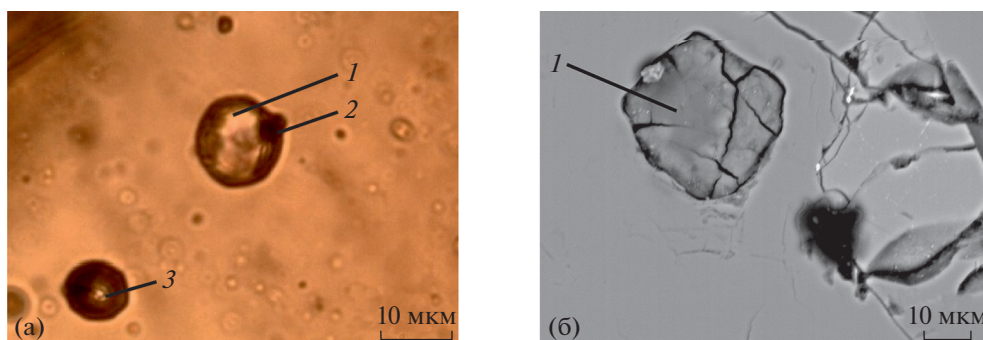
вые включения углекислоты (рис. 3 а). Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) [17] в них установлены твердые фазы, отвечающие карбонату (рис. 4).

Расплавные включения, обнаруженные в геденбергите и плагиоклазе трахитов, располагают-

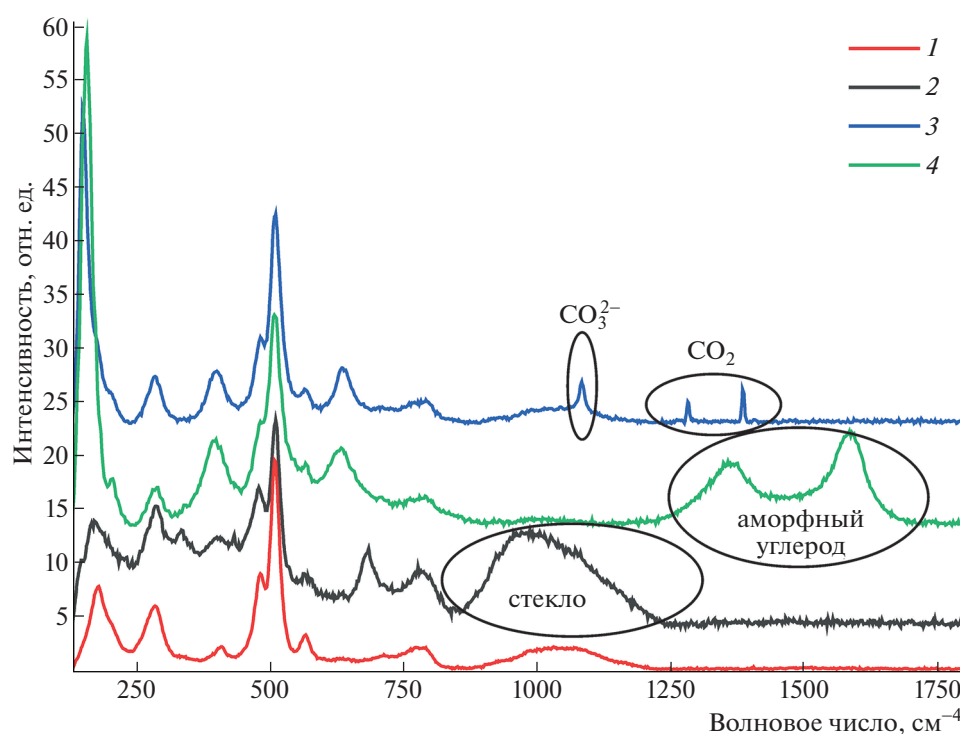
ся азонально и имеют округлую или эллипсоидную форму и размеры от 10 до 50 мкм. Для изучения выбирались наиболее представительные включения размером от 20 мкм. Включения в клинопироксене стекловатые и содержат стекло, кайму и рудные минералы (ильменит, титаномагнетит, пирротин). Включения в плагиоклазе ча-



**Рис. 2.** Спектры распределения содержаний редких и редкоземельных элементов в породах вулкана Ван-Тянь. 1 — толеитовые базальты щитовой постройки и конуса вулкана Ван-Тянь; 2 — трахиты вулкана Ван-Тянь; 3 — базальты ОІВ-типа. Нормирование относительно примитивной мантии и хондрита по [16].



**Рис. 3.** Флюидные включения и глобулы водосодержащего железистого стекла в плагиоклазе трахита вулкана Ван-Тянь: (а) в проходящем свете без анализатора; (б) в отраженных электронах. 1 – водосодержащее железистое стекло; 2 – аморфный углерод; 3 – включение  $\text{CO}_2$ .

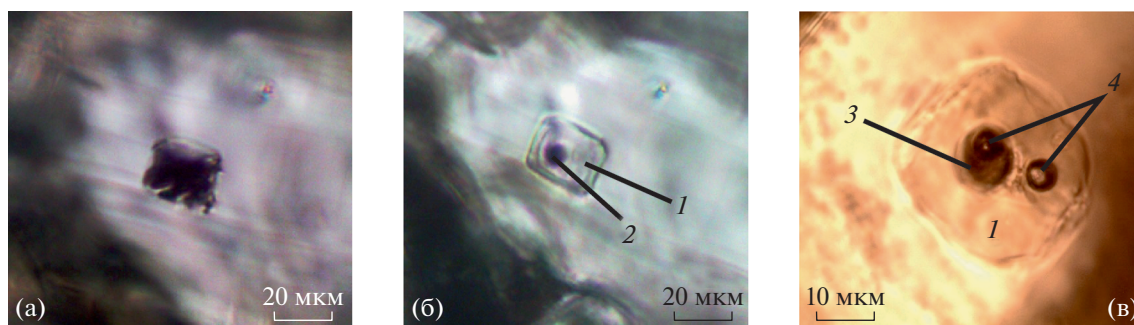


**Рис. 4.** Спектры комбинационного рассеяния плагиоклаза-хозяина, фаз во флюидных включениях и в водосодержащих железистых глобулах, а также стекло расплавных включений. 1 – плагиоклаз-хозяин; 2 – стекло расплавного включения; 3 – аморфный углерод в глобулах водосодержащего железистого стекла; 4 – флюидное включение  $\text{CO}_2$  с реликтами карбоната.

стично раскристаллизованы и состоят из плагиоклазовой каймы и тонкозернистого агрегата, представляющего собой смесь кристаллов клинопироксена, плагиоклаза, титаномagnetита и ильменита.

Термометрические эксперименты с расплавленными включениями в геденбергите и плагиоклазе показали, что полная гомогенизация включений в геденбергите происходит при  $1080\text{--}1100^\circ\text{C}$ , а в плагиоклазе – при  $1050\text{--}1060^\circ\text{C}$  (рис. 5 а, б).

Следует отметить, что расплавные включения в плагиоклазе гомогенизировались не всегда. Часто они взрывались, а в ряде случаев после закалки включения содержали стекло, кристаллическую фазу и газовый пузырек (рис. 5 в). По результатам исследования гретых расплавных включений методом КР-спектроскопии (рис. 4) было установлено, что расплавные включения после термометрического эксперимента зачастую содержат твердую фазу, в которой фиксируется пузырек  $\text{CO}_2$  (рис. 4). Сама твердая фаза отвечает



**Рис. 5.** Расплавные включения в плагиоклазе трахита, в проходящем свете без анализатора: (а) — при температуре 20°C, (б, в) — при температуре 1050°C. 1 — стекло расплавного включения; 2 — газовый пузырек; 3 — карбонат; 4 — CO<sub>2</sub>.

иону CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> с характеристическим пиком ~1077 см<sup>-1</sup> (рис. 4).

Стекла гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазе соответствуют по составу изученным трахитам и характеризуются высокими концентрациями FeO — до 6.0 мас. %, TiO<sub>2</sub> — до 1.0 мас. % и щелочей, в сумме достигающих 7.0–8.0 мас. %, при содержании SiO<sub>2</sub> 64–67 мас. % (табл. 2).

*Глобулы, стекла и кристаллические включения в минералах трахитов.* В фенокристаллах геденбергита и плагиоклаза трахитов обнаружены кристаллические включения, представленные апатитом, ильменитом и титаномagnetитом. Также в минералах трахитов (в геденбергите, плагиоклазе и апатите) выявлены различные глобулы: сульфидные, представленные пирротинном, и силикатные, которые соответствуют железистому водосодержащему стеклу (рис. 3 а, б, табл. 2). Железистое стекло зачастую находится в сростании с титаномagnetитом и аморфным углеродом. Кроме того, аморфный углерод часто образует пленки на железистом силикатном стекле.

Железистые силикатные глобулы так же, как и железистое силикатное стекло, обнаруженное в минеральных сегрегациях основной массы пород, содержат до 30 мас. % FeO, до 5 мас. % MgO, до 2 мас. % CaO, до 4 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и не более 0.5 мас. % (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) при содержании SiO<sub>2</sub> 43–45 мас. % (табл. 2). Судя по дефициту суммы, железистые стекла содержат до 10–15 мас. % H<sub>2</sub>O.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

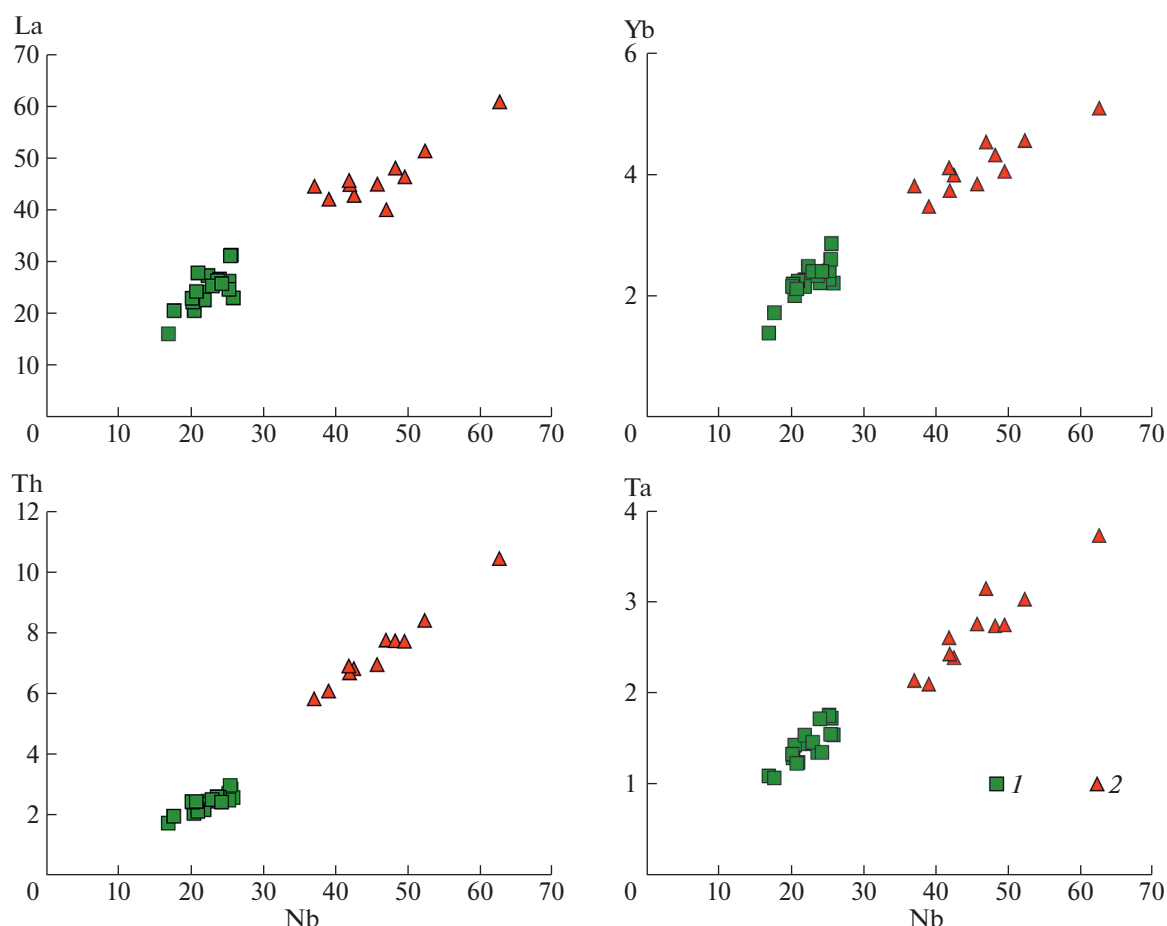
Анализ проведенных петролого-геохимических исследований пород и данных изучения включений минералообразующих сред в фенокристаллах трахитов вулкана Ван-Тянь позволили выявить следующие закономерности.

*Геохимические исследования.* На спайдер-диаграммах (рис. 2) видно, что характер распределения элементов-примесей в толеитовых базальтах

вулкана Ван-Тянь сопоставим с таковым для базальтов ОИВ-типа, отличаясь от последнего повышенными концентрациями Ba и Pb, а также несколько пониженными содержаниями ряда редких элементов, таких как Th, U, Nb и Ta. Эти их характеристики указывают на участие в формировании расплавов метасоматизированной литосферной мантии [10]. В ряду пород от базальтов к трахитам происходит обогащение последних практически всеми несовместимыми элементами. Исключение составляют Eu и Sr, что связывается с фракционированием плагиоклаза. Увеличение концентраций Ba и Rb при переходе от базальтов к трахитам указывает на то, что на момент формирования трахитов не кристаллизовался калиевый полевой шпат, поэтому Ba и Rb ведут себя так же, как и другие несовместимые элементы, накапливаясь в расплаве.

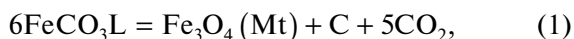
Для оценки роли кристаллизационной дифференциации при эволюции расплавов вулкана Ван-Тянь нами использовались содержания такого несовместимого элемента, как Nb, чей коэффициент распределения между кристаллическими фазами и расплавом стремится к нулю. На вариационных диаграммах (рис. 6) видно, что концентрации Zr, Ta, Th, а также практически всех РЗЭ в породах находятся в прямой корреляционной зависимости от Nb. Такое поведение элементов-примесей свидетельствует о доминирующей роли процесса кристаллизационной дифференциации при формировании всего спектра пород вулкана Ван-Тянь — от базальтов до трахитов.

*Изучение включений минералообразующих сред.* Присутствие в плагиоклазе включений углекислоты, в которых методом КР-спектроскопии установлены фазы, содержащие ионы CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (рис. 4), указывает на то, что в системе присутствует карбонат. Ранее нами было описано присутствие феррокарбонатов в толеитовых базальтах вулкана Ван-Тянь [18], которые кристаллизовались из несовместимого с силикатным феррокарбонатного расплава. Феррокарбонатный расплав образовывал-



**Рис. 6.** Вариационные диаграммы содержаний различных микроэлементов (ppm) относительно концентраций Nb в породах вулкана Ван-Тянь. 1 – толеитовые базальты щита и конуса; 2 – трахиты.

ся в результате реакции поднимающихся к поверхности базальтовых магм с вмещающими мраморами [18]. Имеющиеся в трахитах реликты карбонатного вещества, скорее всего, унаследованы от исходного базальтового расплава, содержащего несмешиваемую с ним феррокарбонатную жидкость. Вероятно, внедрявшийся с базальтовой магмой феррокарбонатный расплав разлагался в приповерхностной камере согласно реакции:



где  $\text{FeCO}_3\text{L}$  – феррокарбонатный расплав, Mt – магнетит, с образованием магнетита, углерода и углекислоты [19].

Помимо реликтов карбоната, выявленных в газовых включениях  $\text{CO}_2$ , о процессе разложения феррокарбонатного расплава свидетельствуют находящиеся в ассоциации с включениями углекислоты магнетит и пленки аморфного углерода, установленных на железистых силикатных глобулах (рис. 3 а, 4). Кроме того, в расплавных включениях в плагиоклазе трахитов после термометрических экспериментов в ряде случаев фиксировались реликты карбонатов, аморфный углерод и

углекислота (рис. 5 в), что также указывает на частичное разложение карбоната.

Обнаруженные в минералах трахитов железистые силикатные стекла (рис. 3, табл. 2) имеют схожий состав с таковыми, установленными нами ранее в качестве глобул во включениях в плагиоклазе и в основной массе базальтов щитовой постройки вулкана Ван-Тянь [9]. Высокие содержания воды (10–15 мас. %) в железистом силикатном стекле в минералах трахитов сопоставимы с таковыми в водосодержащих железистых стеклах в толеитовых базальтах вулкана Ван-Тянь [9]. Как было показано [9], присутствие железистых и кислых силикатных стекол в интерстициальном пространстве основной массы, а также в расплавных включениях в плагиоклазе базальтов свидетельствует о протекании процесса силикатно-силикатной жидкостной несмешиваемости на завершающих стадиях кристаллизации этих пород. Расслоение на две несмешивающиеся силикатные жидкости происходит при дифференциации ферробазальтовых магм по феннеровскому типу, как для закрытых по кислороду систем (массивы Скаергаард, Септ-Иль и др.), так и для открытых

(трапповые провинции Сибири и Индии, вулканические комплексы Эль Лако, Ван-Тянь и др.), когда концентрации FeO в расплавах достигают 15–18 мас. % [2, 9, 20]. В частности, такой механизм был реализован при формировании щитовых базальтов вулкана Ван-Тянь. Судя по всему, в процессе кристаллизационной дифференциации базальтовых магм образующиеся трахитовые расплавы наследовали не только проявления силикатно-карбонатной, но и силикатно-силикатной несмешиваемости.

Образование трахитов с установленными характеристиками мы рассматриваем в рамках следующей модели. В приповерхностную магматическую камеру внедрялся базальтовый расплав, сопровождаемый небольшими порциями феррокарбонатного расплава, который образовался при реакционном взаимодействии силикатного расплава с карбонатной средой рамы. В результате кристаллизационной дифференциации по фенне-ровскому тренду базальтовый расплав расслаивался на две несмешивающиеся силикатные жидкости — кислую и железистую. Часть такой магмы, изливалась на поверхность, формируя щитовые базальты вулкана Ван-Тянь [9]. Оставшийся в магматической камере расплав продолжал дифференцироваться, изменяя характер тренда в результате кристаллизации магнетита и таких железосодержащих силикатов, как клинопироксен и фаялит. В результате кристаллизационной дифференциации в приповерхностной камере образовывался трахитовый расплав, унаследовавший от исходной толеитовой базальтовой магмы несмешиваемые феррокарбонатную и водосодержащую ферробазальтовую жидкости. При подъеме такого гибридного расплава к поверхности при снижении температуры и давления феррокарбонатная жидкость разлагалась на магнетит, углерод и уголекислоту.

## ВЫВОДЫ

1. На основе метода изучения расплавных включений определено, что геденбергит и плагиоклаз трахитов вулкана Ван-Тянь кристаллизовались в приповерхностной магматической камере при температурах 1080–1100 и 1050–1060°C, соответственно, из трахитового расплава. В расплавных включениях в плагиоклазе после термометрических экспериментов были определены уголекислота, аморфный углерод и ионы  $\text{CO}_3^{2-}$ . В фенокристаллах трахитов были обнаружены водосодержащие железистые глобулы, а также включения  $\text{CO}_2$ , содержащие реликты карбонатов.

2. Результаты геохимического исследования пород вулкана Ван-Тянь показали, что весь спектр изученных вулканитов — от толеитовых базальтов до трахитов — формировался при доминирующей роли кристаллизационной дифференциации.

3. Показано, что образующийся при дифференциации трахитовый расплав наследовал от исходной базальтовой магмы существовавшие в ней несмешиваемые с силикатными феррокарбонатную и водосодержащую железистую жидкости. При подъеме такого гибридного расплава к поверхности при снижении температуры и давления феррокарбонатная жидкость разлагалась на магнетит, углерод и уголекислоту.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMMN-2021-0006.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muir I.D., Tilley C.E. // American Journ of Science. 1963. V. 261. P. 111–128.
2. Рябов В.В. Новосибирск: Наука СО РАН, 1989. 224 с.
3. Ярмолюк В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М. и др. Позднекайнозойская вулканическая провинция Центральной и Восточной Азии // Петрология. 2011. Т. 11. № 4. С. 341–362.
4. Macdonald G.A., Katsura T. // J. Petrol. 1964. V. 5. № 1. P. 82–13.
5. Chen C.-Y., Frey F.A., Garcia M.O., et al. // Contrib Mineral Petrol. 1991. V. 106. P. 183–200.
6. Carmichael I.S.E. // J. Petrol. 1964. V. 5. P. 435–460.
7. Fan Q., Liu R., Li D., Li Q. // Chinese Sci. Bull. 1999. V. 44. № 7. P. 660–663.
8. Cousens B.L., Clague D.A., Sharp W.D. // Geochemistry, Geophysics. Geosystems. 2003. V. 4. № 9. P. 1–27.
9. Андреева О.А., Андреева И.А., Ярмолюк В.В. и др. // Петрология. 2020. Т. 28. № 4. С. 393–412.
10. Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Саватенков В.М. и др. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 1. С. 50–59.
11. Перетяжко И.С., Савина Е.А. // ДАН. 2014. Т. 457. № 6. С. 704–709.
12. Ghiorso M.S., Carmichael I.S.E. // Rev. Mineral. Geochem. 1987. № 17. P. 467–499.
13. Козловский А.М., Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. и др. // Петрология. 2007. Т. 15. № 3. С. 257–282.
14. Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Андреева И.А. и др. // Петрология. 2018. Т. 26. № 5. С. 535–566.
15. Tang H., Kong T., Wu Ch., et al. // Acta Geologica Sinica. 2017. V. 91. № 5. P. 1717–1732.
16. Sun S.-S., McDonough W.F. Eds. A.D. Saunders and M.J. Norry. Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1989. P. 313–345.
17. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. // J. of Geochem. Explor. 2012. V. 112. P. 1–20.
18. Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Андреева И.А. и др. // Материалы XII международной Школы по наукам о Земле им. проф. Л. Л. Перчука (ISES-2022). 2022. С. 13.
19. Kang N., Schmidt M.W., Poli S., et al. // Chem. Geol. 2015. V. 400. P. 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.02.005>
20. Charlier B., Namur O., Toplis M.J., et al. // Geology. 2011 V. 39 P. 907–910.

## FORMATION OF TRACHYTES FROM WANGTIAN'E VOLCANIC NECK OF THE CHANGBAISHAN AREA (NORTHEAST CHINA) AS A RESULT OF THOLEIITIC MAGMA CRYSTAL FRACTIONATION

O. A. Andreeva<sup>a, #</sup>, I. A. Andreeva<sup>a</sup>, A. I. Usoltseva<sup>b</sup>, Academician of the RAS V. V. Yarmolyuk<sup>a</sup>,  
E. V. Kovalchuk<sup>a</sup>, A. A. Averin<sup>c</sup>, J.-Q. Ji<sup>d</sup>, and X. Zhou<sup>d</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Frumkin Institute Of Physical Chemistry And Electrochemistry RAS, Moscow, Russian Federation*

<sup>d</sup>*School of Earth and Space Sciences Peking University, Beijing, China*

<sup>#</sup>*E-mail: oandreeva@igem.ru*

Tholeiitic basalts and trachytes of Wangtian'e bimodal association are studied. It is shown that trachytes were formed under the leading role of crystal fractionation of the initial tholeiitic magma. Based on the method of melt and fluid inclusion studies, it was determined that hedenbergite phenocrysts from Wangtian'e volcanic neck crystallized in the temperature range of 1080–1100°C, and plagioclase phenocrysts crystallized at temperatures of 1050–1060°C. After thermometric experiments with melt inclusions in plagioclase from trachytes, in some cases relics of carbonates and carbon dioxide were observed in the inclusions. Trachyte phenocrysts contain hydrous Fe-rich silicate globules and CO<sub>2</sub> inclusions containing carbonate phases. Fe-rich silicate globules are often intergrown with titanomagnetite and covered with films of amorphous carbon. A model the appearance of hydrous Fe-rich globules and CO<sub>2</sub> inclusions with carbonate relics is proposed. It results due to the silicate-silicate and silicate-carbonate liquid immiscibility processes, that are caused by the evolution of the initial basaltic melt. As the trachyte melt has been risen to the surface, the ferrocarbonate liquid decomposed into magnetite, carbon, and carbon dioxide.

**Keywords:** Cenozoic volcanism, bimodal magmatism, trachytes, crystal fractionation, silicate-silicate liquid immiscibility, silicate-carbonate liquid immiscibility, melt inclusions, fluid inclusions