

УДК 552.11

## ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АНДЕЗИТОВОГО РАСПЛАВА ПРИ УМЕРЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ ВОДОРОДА (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

© 2024 г. Э. С. Персиков<sup>a,\*</sup>, П. Г. Бухтияров<sup>a,\*\*</sup>, О. Ю. Шапошникова<sup>a,\*\*\*</sup>,  
Л. Я. Аранович<sup>b,\*\*\*\*</sup>, А. Н. Некрасов<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт экспериментальной минералогии им. Академика Д. С. Коржинского РАН,  
ул. Академика Осипяна, 4, Черноголовка, 142432 Россия

<sup>b</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: persikov@iem.ac.ru

\*\*e-mail: pavel@iem.ac.ru

\*\*\*e-mail: zakrev@iem.ac.ru

\*\*\*\*e-mail: lyaranov@igem.ru

\*\*\*\*\*e-mail: alex@iem.ac.ru.

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 02.11.2023 г.

Принята к публикации 08.11.2023 г.

Важные проблемы дифференциации магмы, образования самородных металлов и процессов рудообразования в земной коре все чаще связывают с активным участием водорода. В данной работе получены новые экспериментальные данные по кристаллизации андезитовых расплавов при высоких температурах (900–1250°C) и давлениях водорода (10–100 МПа), которые уточняют возможную роль водорода в процессах, происходящих в андезитовых расплавах в земной коре и при вулканизме в сильно восстановленных условиях ( $f(\text{O}_2) = 10^{-17}–10^{-18}$ ). В экспериментах по кристаллизации было установлено, что составы кристаллов (пироксены и плагиоклазы), образовавшихся в экспериментах по кристаллизации расплава андезита под давлением водорода, близко соответствуют составам кристаллов лавовых потоков вулкана Авача на Камчатке. Этот результат можно рассматривать как экспериментальное подтверждение участия водорода в вулканическом процессе.

**Ключевые слова:** андезитовый расплав, водород, давление, температура, самородное Fe, кристаллизация, восстановительные условия

DOI: 10.31857/S0016752524040047, EDN: KLMGXF

### ВВЕДЕНИЕ

Роль водорода, самого распространенного элемента нашей Галактики, в природных процессах чрезвычайно разнообразна и в последние годы привлекает все большее внимание петрологов и геохимиков. В том числе проблемы дифференциации магм, формирование самородных металлов и процессы рудообразования в земной коре все чаще связываются с активным участием водорода (Bird et al., 1981; Рябов и др., 1985; Олейников и др., 1985; Marakushev, 1995; Левашов, Округин, 1984; Tomshin et al., 2023; и др.). Недавно нами были получены первые результаты по экспериментальному моделированию образования самородных металлов в земной коре при взаимодействии водорода с базальтовыми расплавами и по кинетике дифференциации базальтовой магмы под давлением водорода

(Persikov et al., 2019). В настоящей работе представлены новые экспериментальные данные по кристаллизации андезитовых расплавов при высоких температурах (900–1250°C) и давлениях водорода (10–100 МПа), которые проясняют возможную роль водорода в процессах, протекающих в андезитовых расплавах в земной коре и при вулканизме в сильно восстановительных условиях.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Эксперименты проводились с помощью уникальной установки высокого газового давления. Этот аппарат оснащен оригинальным внутренним устройством, что позволило проводить длительные эксперименты при таких высоких температурах, несмотря на высокую проникающую способность

водорода. Подробно это устройство рассмотрено в работе (Persikov et al., 2019, рис. 1), здесь же поясним в кратком виде. Устройство включает молибденовый реактор с помещенной в него молибденовой ампулой с исходным образцом переплавленного андезита (примерно 150 мг). Реактор герметично соединен с поршневым уравнителем-разделителем. Внутренние объемы молибденового реактора и уравнителя-разделителя под поршнем заполняли водородом при давлении 10 МПа с использованием специальной системы. Собранный таким образом устройство вместе с внутренним нагревателем размещали внутри сосуда высокого газового давления (ИНРВ) таким образом, чтобы ампула с образцом андезита находилась в безградиентной температурной зоне нагревателя. За счет перемещения поршня уравнителя-разделителя давление водорода во внутреннем объеме молибденового реактора всегда сохранялось равным давлению газа (Ar) в сосуде в процессе опыта. В начале эксперимента давление аргона в сосуде и, соответственно, водорода в реакторе поднимали в течение 1 часа до необходимого значения 100 МПа. Далее поднимали температуру опыта до необходимой величины 1250°C. Выдерживали при указанных параметрах в автоматическом режиме 1 час, затем снижали давления водорода до

10 МПа в изотермическом режиме в течение 1 часа, выдержка 1 час, а затем снижение температуры до 1000°C или 900°C, выдержка 2 часа (кристаллизация), после чего осуществлялась изобарическая закалка при выключенном внутреннем нагревателе установки. Такая методология экспериментов использована с целью моделирования подъема кристаллизующейся андезитовой магмы из условий гипабиссальной фации в близповерхностные условия до уровня вулканического извержения в сильно восстановительных условиях.

Скорость закалки образцов составляла ~300°C/мин. Погрешность измерения температуры опыта составляла  $\pm 5^\circ\text{C}$ , а давления водорода  $\pm 0.1\%$  отн. После изобарической закалки, сброса давления в сосуде и полного охлаждения внутреннее устройство извлекалось из сосуда высокого газового давления, ампула с образцом извлекались из молибденового реактора для последующего анализа фаз, образовавшихся во время опыта. В качестве исходного образца в опытах использованы природные образцы андезита вулкана Авача (Камчатка). Стекла исходного андезита, необходимые для последующих опытов, были синтезированы плавлением порошков андезита в высокотемпературной печи в открытых

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) и структурно-химический параметр ( $100\text{NBO}/T$ ) исходного андезита (стекло), минералов и расплавов (стекла) после экспериментов под давлением водорода

| Компоненты                     | № 2157<br>1      | № 2157<br>2      | № 2157<br>3      | № 2158<br>4      | № 2158<br>5      | № 2158<br>6      | Состав<br>исходного<br>андезита<br>(стекло) |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 62.75 $\pm$ 0.62 | 54.89 $\pm$ 0.58 | 65.69 $\pm$ 0.6  | 60.44 $\pm$ 0.62 | 67.14 $\pm$ 0.6  | 51.74 $\pm$ 0.58 | 58.80 $\pm$ 0.66                            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.88 $\pm$ 0.4  | 13.64 $\pm$ 0.32 | 18.55 $\pm$ 0.38 | 16.30 $\pm$ 0.38 | 18.43 $\pm$ 0.36 | 13.93 $\pm$ 0.34 | 16.62 $\pm$ 0.4                             |
| FeO*                           | 2.86 $\pm$ 0.34  | 5.3 $\pm$ 0.56   | 2.96 $\pm$ 0.34  | 4.35 $\pm$ 0.32  | 2.15 $\pm$ 0.32  | 5.44 $\pm$ 0.56  | 6.66 $\pm$ 0.46                             |
| MnO                            | 0.23 $\pm$ 0.22  | 0.14 $\pm$ 0.24  | 0.33 $\pm$ 0.2   | 0.15 $\pm$ 0.21  | 0.13 $\pm$ 0.22  | 0.27 $\pm$ 0.22  | 0.11 $\pm$ 0.01                             |
| MgO                            | 1.85 $\pm$ 0.22  | 14.75 $\pm$ 0.54 | 1.39 $\pm$ 0.2   | 5.47 $\pm$ 0.18  | 0.67 $\pm$ 0.18  | 13.85 $\pm$ 0.56 | 5.59 $\pm$ 0.32                             |
| CaO                            | 7.34 $\pm$ 0.32  | 8.05 $\pm$ 0.24  | 4.43 $\pm$ 0.26  | 7.29 $\pm$ 0.3   | 4.18 $\pm$ 0.26  | 12.54 $\pm$ 0.22 | 6.77 $\pm$ 0.3                              |
| Na <sub>2</sub> O              | 4.89 $\pm$ 0.36  | 1.74 $\pm$ 0.3   | 4.00 $\pm$ 0.34  | 4.03 $\pm$ 0.36  | 4.42 $\pm$ 0.34  | 1.25 $\pm$ 0.3   | 4.15 $\pm$ 0.4                              |
| K <sub>2</sub> O               | 1.54 $\pm$ 0.18  | 0.69 $\pm$ 0.16  | 1.84 $\pm$ 0.2   | 1.26 $\pm$ 0.16  | 1.88 $\pm$ 0.18  | 0.33 $\pm$ 0.16  | 1.32 $\pm$ 0.2                              |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.66 $\pm$ 0.18  | 0.62 $\pm$ 0.18  | 0.81 $\pm$ 0.18  | 0.68 $\pm$ 0.18  | 1.00 $\pm$ 0.2   | 0.6 $\pm$ 0.18   | 0.59 $\pm$ 0.2                              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.18 $\pm$ 0.14  | н. о.            | н. о.            | н. о.            | 0.00             | 0.00             | 0.20 $\pm$ 0.18                             |
| H <sub>2</sub> O               | 0.21 $\pm$ 0.01  | 0.00             | н. о.            | 0.37             | 0.00             | 0.00             | 0.11 $\pm$ 0.01                             |
| Сумма                          | 100              | 99.88            | 100              | 100.37           | 100              | 99.96            | 100                                         |
| $100\text{NBO}/T$              | 26.6             | 81               | 20.1             | 30.6             | 22.4             | 93               | 39.1                                        |

Примечания. \* Общее содержание железа.

1 – стекло,  $P(\text{H}_2) = 100$  МПа,  $T = 1250^\circ\text{C}$ , выдержка 1 час, затем снижение давления водорода до 10 МПа в изотермическом режиме в течение 1 часа, выдержка 1 час, а затем снижение температуры до 1000°C, выдержка 2 часа (кристаллизация) и далее изобарическая закалка; 2 – кристаллы пироксенов; 3 – плагиоклазы; 4 – стекло, параметры опыта те же, только температура кристаллизации – 900°C; 5 – плагиоклазы; 6 – кристаллы пироксенов.

платиновых ампулах при  $T = 1400^\circ\text{C}$ , в течение 4 часов, и атмосферном давлении с последующей быстрой закалкой образца. Химический состав полученных в опытах фаз (табл. 1, 2) определяли с помощью рентгеновских энергодисперсионных спектрометров, установленных на цифровых сканирующих микроскопах Tescan Vega TS5130MM (CamScan MV2300) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 и с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA PentaFET x3 и Tescan Vega II XMU с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 с полупроводниковым Si(Li) детектором INCA X-sight и волнодисперсионным (волновым) спектрометром INCA Wave 700. Расчеты результатов химического состава производились программой INCA Suite version 4.15 пакета программ The Microanalysis Suite Issue 18d + SP3. Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 kV с током пучка от 200 до 400 pA и времени набора спектров 50–100 с. Следующие стандарты были использованы: кварц для Si и O, альбит для Na, микролин для K, волластонит для Ca, чистый титан для Ti, корунд для Al, чистый марганец для Mn, чистое железо для Fe, периклаз для Mg, чистые никель и кобальт для Ni и Co. Для стандартизации данных микрозондового анализа использовали программы: INCA Energy 200 и программу А.Н. Некрасова INCA (см. табл. 1 и 2 соответственно). Содержание воды, образовавшейся в закаленных образцах в ходе опытов (табл. 1), определяли методом Карл-Фишер титрования с использованием прибора KFT AQUA 40.00.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Составы исходного андезита, а также кристаллов и стекол, полученных в опытах различной продолжительности, приведены в табл. 1. Для сравнения исходного состава андезита со стеклами – продуктами опытов использовалась не разница в концентрациях главных порообразующих компонентов, а валовая основность расплавов, которая численно определяется с помощью структурно-химического параметра  $100NBO/T$  – степень деполимеризации, или коэффициент основности. Этот структурно-химический параметр расплавов достаточно корректно отражает основность магматических расплавов и, соответственно, особенности валового химического состава и структуры силикатных магматических расплавов, что детально обосновано ранее (Persikov et al., 1990; Persikov, 1998; Mysen, 1991).

Уменьшение суммарного содержания оксидов железа в силикатных стеклах – продуктах опытов по сравнению с исходным андезитом (табл. 1) хорошо согласуется с выделением самородного металла под давлением  $H_2$ . Однако, несмотря на высокий восстановительный потенциал системы андезито-

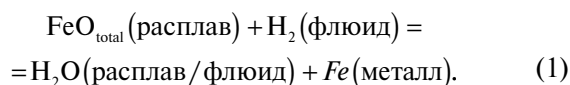
**Таблица 2.** Химические составы (мас. %) металлических фаз в андезитовых расплавах (закаленных образцах) после экспериментов под давлением водорода

| Компоненты | № 2157           | № 2158           |
|------------|------------------|------------------|
| Fe         | $98.07 \pm 1.32$ | $98.88 \pm 1.34$ |
| Mg         | $0.84 \pm 0.22$  | $0.12 \pm 0.02$  |
| Ti         | 0.08             | менее 0.15       |
| O          | $1.2 \pm 0.51$   | $0.7 \pm 0.2$    |
| Si         | менее 0.16       | менее 0.05       |
| Ca         | менее 0.23       | менее 0.07       |
| P          | менее 0.52       | менее 0.03       |
| Сумма      | 101.1            | 100.00           |

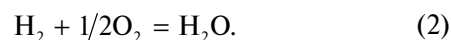
Примечания. Результаты, представленные в таблице, являются средними значениями из 7 измерений.

Концентрации всех примесных элементов (Si, Ca, Ti, P), в металлических фазах определяются приближенно, так как эти значения находятся в пределах аналитических погрешностей.

вый расплав – водород, восстановление оксидов железа протекает не до конца. Это обусловлено образованием  $H_2O$  в исходно сухом расплаве по схематической реакции:



Вода, растворенная в расплаве, а также присутствующая во флюиде, и водород образуют буферную смесь в отношении летучести кислорода  $f(O_2)$ :



Вычитая (2) из (1), получим упрощенную буферную реакцию:



В работе (Ariskin et al., 1993) предложено уравнение, позволяющее рассчитывать значения  $f(O_2)$  для железосодержащих силикатных расплавов, равновесных с металлическим железом, при известных  $P$ - $T$  параметрах. Расчет по этому уравнению для опыта 2157 ( $1000^\circ\text{C}/10$  МПа) дал значение  $\log f(O_2) = -17.0$ , а для опыта 2158 ( $900^\circ\text{C}/10$  МПа)  $\log f(O_2) = -18.2$ . Эти значения лежат на 1.5–2 логарифмические единицы ниже кривой, соответствующей буферу Fe-FeO, рассчитанному по данным (Woodland, O'Neill, 1997).

Полученные оценки  $f(O_2)$  позволяют рассчитать концентрацию  $H_2O$  в газовой фазе, исходя из условий равновесия реакции (2):

$$f(H_2O)/[f(H_2) \cdot f(O_2)^{0.5}] = \exp[-\Delta G_0(2)/RT], \quad (4)$$

где  $f(i)$  – летучесть компонента  $i$  в газовой фазе,  $\Delta G_0(2)$  – стандартная свободная энергия Гиббса реакции (2) при фиксированных  $T$ ,  $T$  – температура в К,  $R = 8.314$  Дж/К/моль – газовая постоянная.

Подставляя в (4) хорошо известные значения  $\Delta G_0(2)$  (Barin, 1995) и приведенные выше значения  $f(O_2)$ , с учетом того, что при параметрах опытов газовая смесь близка к идеальной (например, Аранович, 2013), для опыта 2157 получили  $f(H_2O) = 0.7$  МПа, а для опыта 2158 –  $f(H_2O) = 1$  МПа.

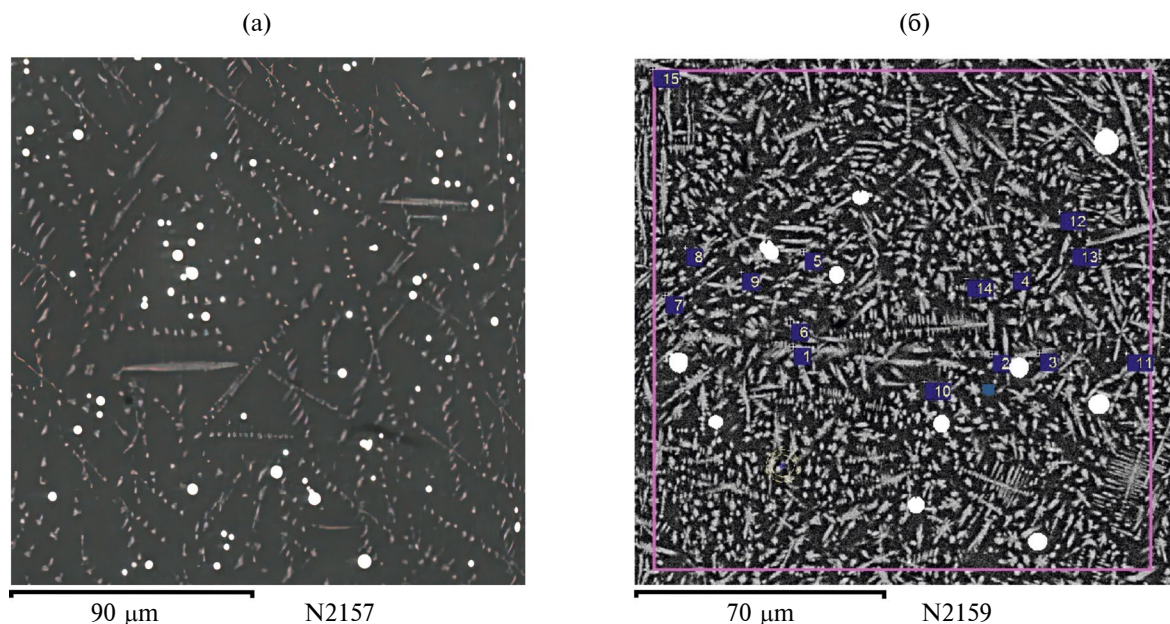
На основе экспериментов установлены следующие особенности процесса взаимодействия водорода с андезитовым расплавом. Как ранее установлено в системе базальт–водород (Persikov et al., 2019), первоначально однородные андезитовые расплавы становятся неоднородными и существенно более кислыми по сравнению с исходным андезитом (табл. 1).  $H_2O$  образуется во флюидной фазе (изначально чистый водород);  $H_2O$  (0.21–0.37 мас. %) растворяется в андезитовых расплавах, а мелкие металлические капли ликвационной текстуры (рис. 1) образуются в них при температуре 1250°C, что подтверждено закалочным опытом (Persikov et al., 2023) и значительно ниже температуры плавления железа (1560°C).

Процесс формирования жидкоподобной структуры Fe (преимущественно мелкие сферы в несколько микрон, рис. 1, состав см. в табл. 2) за счет

окислительно-восстановительных реакций, несомненно, сложен. Отметим, что, в отличие от системы базальт–водород, в системе андезит–водород не наблюдается коалесценции образовавшихся металлических шариков, что, видимо, связано с большей вязкостью андезитового расплава. Новые экспериментальные данные (Bukhtiyarov, Persikov, 2021; Persikov, Bukhtiyarov, 2021) и расчеты вязкости этих расплавов по нашей модели достоверных прогнозов вязкости магматических расплавов (Persikov et al., 2020) подтверждают это предположение: вязкость андезитовых расплавов примерно на два порядка величины больше вязкости базальтовых расплавов при параметрах опытов.

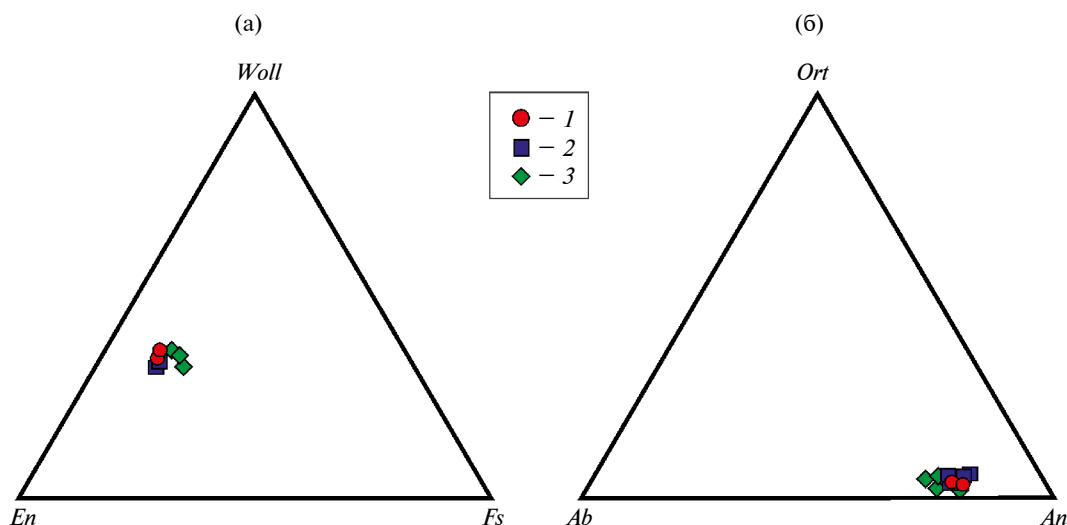
В кристаллизационных экспериментах установлено, что составы кристаллов (клинопироксенов и плагиоклазов), образующихся в эксперименте по кристаллизации расплава андезита, близко соответствуют составам кристаллов лавовых потоков вулкана Авача на Камчатке (рис. 2). Этот результат предположительно можно рассматривать как экспериментальное подтверждение участия водорода в магматическом процессе, что также согласуется с составом вулканических газов, обнаруженных при извержении этого вулкана (Иванов, 2008).

Отметим, что самородное железо ликвационной структуры не обнаружено в андезитовых лавовых



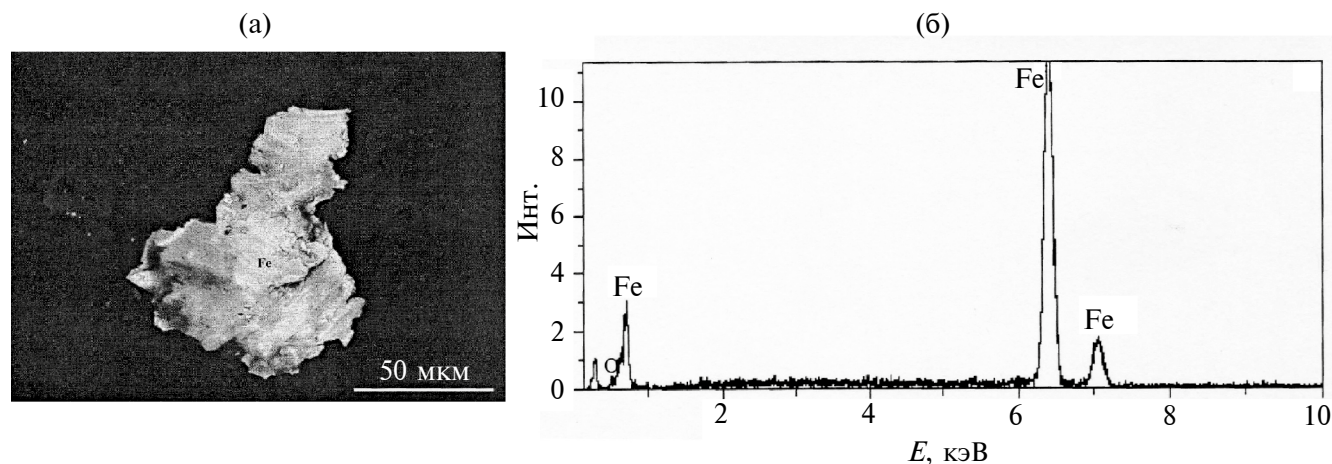
**Рис. 1.** Растровое изображение в отраженных рассеянных электронах (BSE) продуктов закалки образцов после опытов по кристаллизации андезитовых расплавов под давлением водорода.

(а) – опыт № 2157, температура кристаллизации равна 1000°C; (б) – опыт № 2158, температура кристаллизации равна 900°C (параметры опытов: см. примечание к табл. 1, белые шарики – металлический сплав Fe, состав – см. табл. 2, темный цвет – остаточное стекло, светло-серый цвет – кристаллы: пироксены, плагиоклазы; состав – см. табл. 1).



**Рис. 2.** Сравнение состава кристаллов, образовавшихся в экспериментах № 2157, 2158 с составами природных минералов из лавовых потоков вулкана Авача, Камчатка (Иванов, 2008), (а) — пироксены — экспериментальные (1 — опыт 2157:  $Wol = 35.44$ ,  $En = 52.85$ ,  $Fs = 11.71$ ; 2 — 2158:  $Wol = 34.28$ ,  $En = 53.5$ ,  $Fs = 12.23$ ); 3 — природные:  $Wol = 34.2$ ,  $En = 48.77$ ,  $Fs = 17.03$ ); приведены средние значения.

(б) — плагиоклазы — экспериментальные: (1 — опыт 2157:  $An = 74.33$ ,  $Ab = 21.24$ ,  $Or = 4.43$ ; 2 — опыт 2158:  $An = 74.11$ ,  $Ab = 22.74$ ,  $Or = 3.15$ ); 3 — природные:  $An = 76.46$ ,  $Ab = 19.11$ ,  $Or = 4.43$ ), приведены средние значения.



**Рис. 3.** Частица металлического железа из вулканического пепла андезитовых вулканов Камчатки. Проба 4437. (а) — изображение в рассеянных отраженных электронах (BSE); (б) — энерго-дисперсионный рентгеновский спектр от него (Карпов, Мохов, 2004).

потоках вулканов Камчатки (Иванов, 2008; Карпов, Мохов, 2004), что, видимо, связано с более высокой вязкостью андезитовых магм по сравнению с базальтовыми и, соответственно, с более медленным подъемом от промежуточных очагов к вулкану, что, видимо, обеспечивало окисление самородного железа в процессе подъема магмы на уровни земной коры с более высоким окислительным потенциалом. При этом отметим, что временная шкала в эксперименте не соответствует природе. В то же время самородное железо часто находили в пеплах андезитовых вулканов Камчатки (Карпов, Мохов, 2004). Пример такого самородного железа приведен на рис. 3.

## КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты являются первым экспериментальным подтверждением реальности процесса образования самородного Fe в земной коре при взаимодействии андезитового расплава с водородом при параметрах гипабиссальной фации.

2. Показано впервые, что процесс металл-силикатной ликвации в андезитовых расплавах при их взаимодействии с водородом может осуществляться при реальных температурах магм в природе ( $\leq 1250^\circ\text{C}$ ), значительно меньше соответствующих температур плавления железа ( $1560^\circ\text{C}$ ).

Авторы признательны Е.Г. Осадческому (ИЭМ РАН), О.А. Луканину (ГЕОХИ РАН) и анонимному рецензенту за ценные замечания, которые способствовали улучшению качества статьи.

Работа выполнена в рамках темы НИР № FMUF-2022-0004 ИЭМ РАН при финансовой поддержке РНФ, грант № 22-27-00124.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аранович Л.Я. (2013) Флюидно-минеральные равновесия и термодинамические свойства смещения флюидных систем. *Петрология*. **21**, 588–599. <https://doi.org/10.7868/S0869590313060022>
- Иванов Б.В. (2008) Андезиты Камчатки. М.: Наука, 470 с.
- Карпов Г.А., Мохов А.В. (2004) Акцессорные самородные рудные минералы эруптивных пеплов андезитовых вулканов Камчатки. *Вулканология и сейсмология*. **4**, 41–49.
- Левашов В.К., Округин Б.В. (1984) Оценка физических условий образования сегрегаций самородного железа в базальтовом расплаве. *Геохимия и минералогия мафитов и ультрамафитов Сибирской платформы*. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 54–62.
- Олейников Б.В., Округин А.В., Томшин М.Д., Левашов В.К., Варганов А.С., Копылова А.Г., Панков В.Ю. (1985) Самородное металлообразование в платформенных базитах. (Под ред. В.В. Ковальского). Якутск: ЯФ СО АН СССР, 188 с.
- Рябов В.В., Павлов А.Л., Лопатин Г.Г. (1985) Самородное железо в сибирских траппах. Новосибирск: Наука СО РАН, 167 с.
- Barin I. (1995) Thermochemical data of pure substances. Third Edition. *VCH Publishers, Inc., New York, USA*, 1885 p.
- Bird J. M., Goodrick C. A., Weathers M. S. (1981) Petrogenesis of Uivaaq iron, Disko Island, Greenland. *J. Geophys. Res. B*. **86**(12), 11787–11806.
- Bukhtiyarov P. G., Persikov E. S. (2021). Study of the comparative effect of high pressures H<sub>2</sub> and Ar (up to 400 MPa) on the viscosity of albite and andesite melts at temperatures of 1200–1400°C. *Experiments in Geosciences*. **27**(1), 140–143.
- Marakushev A.A. (1995) Nature of native metals formation. *Doklady RAS*. **341**(6), 807–812.
- Mysen B. O. (1991) Relation between structure, redox equilibria of iron and properties of magmatic liquids. In: *Physical Chemistry of Magma* (eds.: L. L. Perchuk and I. Kushiro). Chapter 2, Springer Verlag, 41–98.
- Persikov E. S., Zharikov V. A., Bukhtiyarov P. G., Pol'skoy S. F. (1990) The effect of volatiles on the properties of magmatic melts. *Eur. J. Mineral.* **2**, 621–642. <https://doi.org/10.1127/ejm/2/5/0621>
- Persikov E. S. (1998) Viscosity of model and magmatic melts at the pressures and temperatures of the Earth's crust and upper mantle. *Russian Geology and Geophysics*. **39**(11), 1780–1792.
- Persikov E. S., Bukhtiyarov P. G., Aranovich L. Ya., Nekrasov A. N., Shaposhnikova O. Yu. (2019) Experimental modeling of formation of native metals (Fe, Ni, Co) in the earth's crust by the interaction of hydrogen with basaltic melts. *Geohem. Int.* **57**(10), 1035–1044. <https://doi.org/10.1134/S0016702919100082>
- Persikov E. S., Bukhtiyarov P. G. (2020) Viscosity of magmatic melts: Improved structural-chemical model. *Chem. Geol.* **556**(2), 119820. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119820>
- Persikov E. S., Bukhtiyarov P. G., Aranovich L. Ya., Shaposhnikova O. Yu., Nekrasov A. N. (2023) Experimental study of the process of interaction of hydrogen with igneous melts in conditions of the Earth's crust. *Russian Geology and Geophysics*, June, 1–13. <https://doi.org/10.2113/RGG20234562>
- Tomshin M. D., Kopylova A. G., Vasilyeva A. E. (2023) Native Iron in Siberian Traps. *Petrology* **31**(2), 223–236. <https://doi.org/10.1134/S0869591123020054>
- Woodland A. B., O'Neill, H. St.C. (1997) Thermodynamic data for Fe-bearing phases obtained using noble metal alloys as redox sensors. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **61**, 4359–4366. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00247-0)

## FEATURES OF CRYSTALLIZATION OF ANDESITE MELT AT MODERATE HYDROGEN PRESSURES (EXPERIMENTAL STUDY)

E. S. Persikov<sup>a,\*</sup>, P. G. Bukhtiyarov<sup>a,\*\*</sup>, O. Yu. Shaposhnikova<sup>a,\*\*\*</sup>,  
L. Ya. Aranovich<sup>b,\*\*\*\*</sup>, A. N. Nekrasov<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Experimental Mineralogy of the Russian Academy of Sciences,  
Academician Osipyan st., Chernogolovka, 4, 142432 Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the  
Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

\*e-mail: persikov@iem.ac.ru

\*\*e-mail: pavel@iem.ac.ru

\*\*\*e-mail: zakrev@iem.ac.ru

\*\*\*\*e-mail: lyaranov@igem.ru

\*\*\*\*\*e-mail: alex@iem.ac.ru.

Received: September 1, 2023

Revised: November 2, 2023

Accepted: November 8, 2023

Important problems of magma differentiation, formation of native metals and ore formation processes in the earth's crust are increasingly associated with the active participation of hydrogen. In this paper, new experimental data on the crystallization of andesite melts at high temperatures (900–1250°C) and hydrogen pressures (10–100 MPa) have been obtained, which clarify the possible role of hydrogen in the processes occurring in andesite melts in the earth's crust and during volcanism under strongly reduced conditions ( $f(\text{O}_2) = 10^{-17}–10^{-18}$ ). In crystallization experiments, it was found that the crystal compositions (pyroxenes and plagioclases) formed in experiments on crystallization of andesite melt under hydrogen pressure closely correspond to the crystal compositions of lava flows of Avacha volcano in Kamchatka. This result can be considered as an experimental confirmation of the participation of hydrogen in the volcanic process.

**Keywords:** andesite melt, hydrogen, pressure, temperature, native Fe, crystallization, reducing conditions