

Микровключения металлов, сплавов и минералов в андезито-дацитах вулкана Бакенинг (Камчатка)

Кожемяко Н.В., Кеpezжинская П.К., Бердников Н.В.

Microinclusions of metals, alloys and minerals in andesites and dacites of the Bakening Volcano (Kamchatka)

Kozhemyako N.V., Kepezhinskas P.K., Berdnikov N.V.

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск;

e-mail: nadezdavitman78925@gmail.com

В работе приводятся новые данные о составе микровключений самородных металлов (Bi, Cu, Co-W), сплавов Cu-Ag-Au и Cu-Sn, хлоридов и сульфидов Ag и Cu, халькопирита, пирротина, пирита и барита в фенокристах и кислом стекле андезито-дацитов вулкана Бакенинг. Предполагается, что в их образовании участвовал богатый Cl и S субдукционный флюид.

Вулкан Бакенинг находится в тыловой зоне активного вулканического фронта Восточной Камчатки, примерно в 125 км от фронтальной группы активных вулканов Корякского и Авачинского. Собственно плейстоцен-голоценовый лавовый конус вулкана сложен амфибол-плагиоклаз-порфиrowыми кремнекислыми андезитами и дацитами и покоится на миоценовом (13.95 млн лет) дислоцированном вулканогенно-осадочном разрезе (в основном плагиоклаз-двупироксеновые андезито-базальты, андезиты и дациты), в свою очередь перекрытом плиоценовыми (3.05 млн лет) субгоризонтальными потоками оливин-двупироксеновых базальтов и андезитов [12]. В составе плиоценового комплекса также выделяется небольшая лавовая постройка оливин-клинопироксен-плагиоклазовых щелочных базальтов с K-Ag возрастом 2.66 млн лет, содержащих обильные ксенолиты шпинелевых верлитов, клинопироксенитов, вебстеритов, реже дунитов. Рядом со стратовулканом Бакенинг находится позднеплейстоценовый (0.16 млн лет [12]) или раннеголоценовый [1] вулкан Ново-Бакенинг, сложенный плагиоклаз-роговообманковыми андезитами и дацитами [9, 12]. Оба андезито-дацитовых вулкана окружены многочисленными средне-кислыми экструзиями и шлаковыми конусами оливин-плагиоклазовых и пироксен-плагиоклазовых базальтов, наиболее молодые из которых (группа конусов Костакан) имеют возраст 500-600 лет [2].

Андезито-дацитовые лавы вулкана Бакенинг характеризуются порфиrowыми структурами, представленными вкрапленниками плагиоклаза и интенсивно опацизированной роговой обманки, содержащими обильные включения титаномагнетита и погруженными в трахитовый матрикс, сложенный дацитовым стеклом и микролитами плагиоклаза, биотита и ванадий-содержащего (до 2 вес. % V_2O_5) титаномагнетита. В составе микрофенокристов присутствует биотит, калий-натровый полевой шпат и кварц. Амфиболы ряда эденитовой и паргаситовой роговых обманок характеризуются варьирующей магнезиальностью. Давление их кристаллизации, рассчитанное по амфиболовому геобарометру [14], соответствует глубинам около 15 км. Вкрапленники плагиоклаза часто зональны, образуют гломеропорфиrowые срастания и варьируют по составу от практически чистого анортита ($An_{>90}$; ядра более крупных зональных фенокристов или мегакристов) до битовнита-андезина-олигоклаза (An_{30-80} ; более мелкие вкрапленники и внешние зоны зональных фенокристаллов). Среди Fe-Ti окислов присутствуют микровкрапленники и микролиты ильменита. Микрофенокристы ильменита характеризуются повышенным содержанием гейкелитового компонента (до 3-4 вес. % MgO), что может свидетельствовать об относительно восстановительных условиях их кристаллизации [10], в то время как микролиты ильменита обеднены MgO и обогащены MnO, что характерно для известково-щелочных вулканических серий [5]. Геохимически андезито-дациты вулкана Бакенинг отвечают кислым дериватам типичных островодужных магм [9], обнаруживающим повышенные отношения Sr/Y (>30), свойственные адакитам [12].

Микровключения металлов размером до 5 микрон и минералов халькофильных и сидерофильных элементов размером от 2 до 15 микрон характеризуются неправильными изометричными или слегка вытянутыми овальными очертаниями (рисунок). Наиболее разнообразные ассоциации микровключений наблюдаются в плагиоклазе и кислом дифференцированном стекле основной массы. Вкрапленники и микрофенокристы плагиоклаза содержат микровключения самородной меди, окиси висмута и Ti-Co-вольфрама, сплавов системы Cu-Ag-Au, нестехометрических хлоридов серебра и сульфидов системы Cu-Ag-S, барита и Cu-содержащего пирротина. Последний также содержится в титаномагнетите.

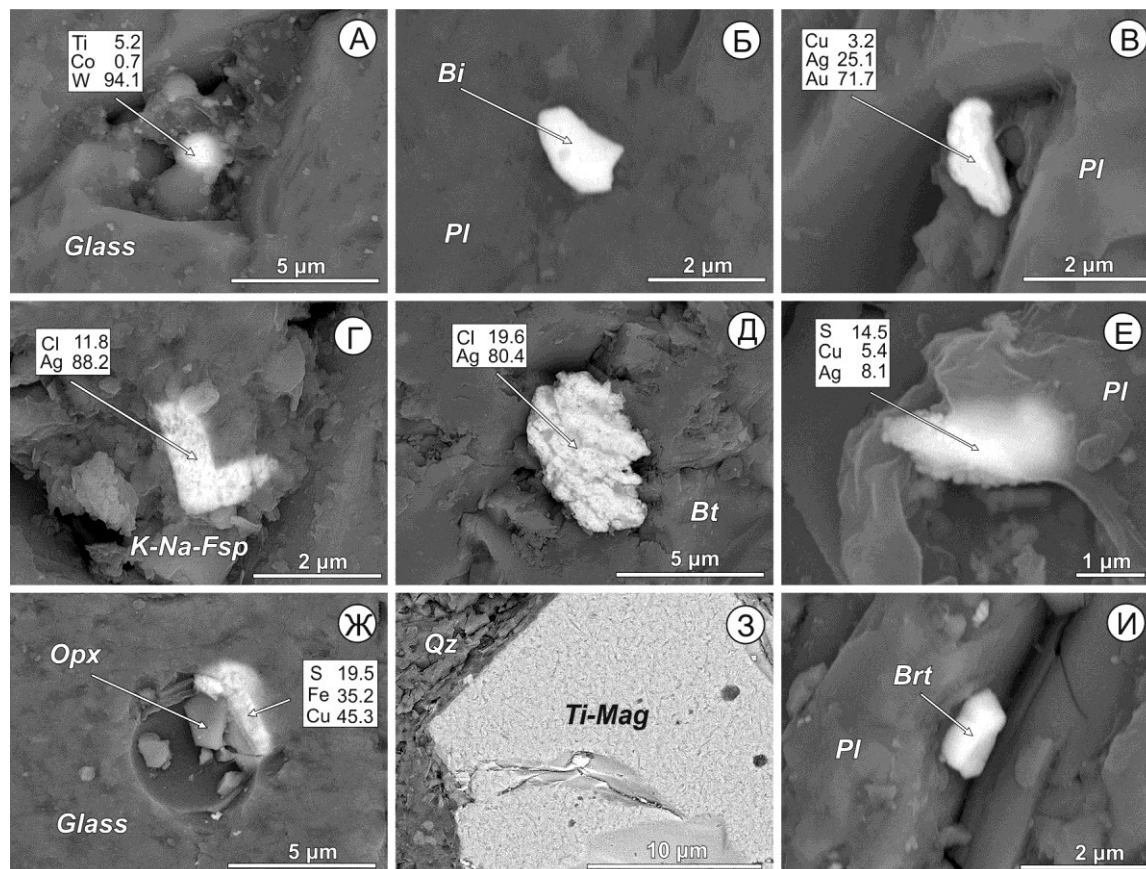


Рисунок. Микровключения самородных металлов и сплавов (а-в), сульфидов Ag и Cu (г-е), сульфидов и сульфатов (ж-и): а – Ti-Co-W в кремнекислом стекле; б – самородный висмут в плагиоклазе; в – сплав Cu-Ag-Au в плагиоклазе; г – хлорид Ag в K-Na полево шпате; д – хлорид Ag в биотите; е – медистый акантит в плагиоклазе; ж – халькопирит и ортопироксен в кремнекислом стекле; з – титаномагнетит (Ti-Mag) в кварце; и – микровключение барита (Brt) в плагиоклазе. Pl – плагиоклаз, Орх – ортопироксен, K-Na-Fsp – K-Na полевой шпат, Bt – биотит; Qz – кварц, Glass – стекло.

В кислом стекле встречаются микровключения титаномагнетита (иногда с сульфидами меди), пирита, касситерита (в ассоциации с кристаллитами кварца), рутила, Ст-Fe шпинели, сплавов Cu-Sn, а также нестехиометрических соединений меди, серебра, серы и хлора. Присутствуют единичные композитные включения ильменита и магнетита с хлорapatитом. В ассоциации с K-Na полевым шпатом в стекловатой основной массе диагностированы выделения сплава Cu-Ag, хлорида серебра, халькопирита, пирротина и магнетита. Вкрапленники амфибола содержат микровключения хлорида серебра, единичное зерно кварца – хлорид меди и серебра, а биотит – сплав Cu-Sn и хлорид серебра.

В целом, ассоциации микровключений металлов, сплавов и минералов в андезито-дацитах вулкана Бакенинг отражают физико-химические условия эволюции известково-щелочных андезитовых расплавов, в частности, участие обогащенных серой

и хлором водных флюидов в процессах фракционирования в относительно малоглубинных промежуточных магматических очагах под вулканическим центром Бакенинг. Важная роль промежуточных коровых очагов дифференциации в эволюции андезитовых магм Камчатки отмечалась неоднократно [3, 4], а присутствие таких очагов под относительно близкой (расстояние чуть более сотни км) Авачинско-Корякской группой вулканов надежно установлено по данным сейсмической томографии [7]. Присутствие хлоридов серебра среди микровключений в лавах Бакенинга свидетельствует в пользу интенсивного массопереноса благородных металлов обогащенными хлором флюидонасыщенными андезитовыми расплавами. Экспериментальные данные и теоретические построения показывают, что повышенные концентрации хлора в субдукционном флюиде резко повышают растворимость в нем металлов с низким (щелочные металлы) или высоким (Sb, Bi, Cu и благородные металлы – Ag, Au, Pt, Pd) потенциалом ионизации, оставляя элементы с промежуточным потенциалом (высокозарядные литофилы) относительно слабо мобильными [8]. Например, в бессолево-водном флюиде коэффициент распределения меди между флюидом и твердой фазой ($D^{\text{fluid/solid}}$) меньше единицы. При солёности водного флюида 10 вес. % NaCl, $D^{\text{fluid/solid}}$ возрастает до 10, вызывая существенное обогащение гидротермального субдукционного флюида медью [13]. Абсолютно такое же поведение обнаруживает и серебро, чья растворимость увеличивается экспоненциально с ростом содержания хлора в высокотемпературном магматическом флюиде [15]. Именно об этом может свидетельствовать присутствие среди микровключений в андезито-дацитах Бакенинга сплавов меди с оловом и серебром, медь-содержащих хлоридов серебра, самородного висмута и меди, а также кобальт-содержащего вольфрама. Все эти металлы достаточно высоко мобильны при повышенных концентрациях хлора в субдукционном флюиде [13]. Вольфрам в отсутствие стабильного рутила выделяется в самородном виде.

Мобильность рудных элементов в андезитовом расплаве вулкана Бакенинг может увеличиваться и за счет повышенного содержания в нем серы, фиксирующегося присутствием микровключений сульфидов (халькопирит, пирротин, пирит, сульфиды меди и серебра), и барита. Большинство халькофильных и сидерофильных элементов накапливается в остаточном расплаве при высокой активности серы, обогащая при этом среднекислые магмы в процессе их кристаллизации в промежуточных очагах под вулканами современных островных дуг [6]. При этом микровключения пирротина и халькопирита в полево-шпате, возможно, отражают несколько более восстановленные условия [11] на ранних этапах эволюции магмы вулкана Бакенинг, в то время как присутствие барита в кислом стекле может свидетельствовать о повышении потенциала серы и кислорода на заключительных этапах ее дифференциации.

Исследование осуществлено в рамках Госзадания ИТиГ ДВО РАН, при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-17-00023 (<https://rscf.ru/project/22-17-00023/>), с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН.

Список литературы

1. *Брайцева О.А., Певзнер М.М.* О возрасте вулкана Ново-Бакенинг (Камчатка) и тефростратиграфии этого района // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 3-12.
2. *Дирксен О.В., Мелекесцев И.В.* Хронология, динамика формирования и морфология эруптивных центров голоценового этапа ареального вулканизма бассейна р. Авача (Камчатка, Россия) // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 3-19.
3. *Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д.* Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 12. С. 1633-1661.
4. *Иванов Б.В., Кадик А.А., Максимов А.П.* Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (на примере Ключевской группы вулканов). Москва: Наука, 1986. 161 с.

5. *Кеpezжинская П.К.* Кайнозойские вулканические серии обрамления окраинных морей. Москва: Наука, 1990. 176 с.
6. *Agangi A., Reddy S.M.* Open-system behaviour of magmatic fluid phase and transport of copper in arc magmas at Krakatau and Batur volcanoes, Indonesia // *Journal of volcanology and geothermal research*. 2016. V. 327. P. 669-686.
7. *Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S. et al.* Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *Journal of geophysical research solid earth*. 2019. V. 124. P. 9694-9713.
8. *Castillo P.R.* Arc magmatism and porphyry-type ore deposition are primarily controlled by chlorine from seawater // *Chemical geology*. 2022. V. 589. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120683>
9. *Dorendorf F., Churikova T., Koloskov A., Wörner G.* Late Pleistocene to Holocene activity at Bakening volcano and surrounding monogenetic centers: volcanic geology and geochemical evolution // *Journal of volcanology and geothermal research*. 2000. V. 104. P. 131-151.
10. *Evans B.W., Scaillet B.* The redox state of Pinatubo dacite and the ilmenite-hematite solvus // *American Mineralogist*. 1997. V. 82. P. 625-629.
11. *Georgatou A., Chiaradia M., Kouzmanov K.* T-P- f_{O_2} conditions of sulfide saturation in magmatic enclaves and their host lavas // *Lithos*. 2021. V. 398-399. <https://doi.org/10.106/j.lithos.2021.106313>
12. *Kepezhinskas P., McDermott F., Defant M.J. et al.* Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. V. 61. P. 577-600.
13. *Liu S., Keppler H.* The mobility of copper, zinc, molybdenum, and tungsten in subduction zone fluids // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2024. V. 365. P. 174-185.
14. *Mutch E.J.F., Blundy J.D., Tattitch B.C. et al.* An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer // *Contributions to mineralogy and petrology*. 2016. V. 171. Art. 85. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1298-9>
15. *Yin Y., Zajacz Z.* The solubility of silver in magmatic fluids: implications for silver transfer to the magmatic-hydrothermal ore-forming environment // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2018. V. 238. P. 235-251.