

Роль метасоматизированной островодужной мантии в формировании изотопной систематики бора изверженных пород Камчатки

Томаникова Л.¹, Савов И.П.¹, Харвей Дж.¹, де Хуг Я.С.М.², Чурикова Т.Г.³, Гордейчик Б.Н.^{3,4}, Муравьев Я.Д.³, Ягодзинский Дж.⁵

The role of metasomatized island-arc mantle in the formation of boron isotope systematics in igneous rocks of Kamchatka

Tomanikova L., Savov I.P., Harvey J., de Hoog J.C.M., Churikova T.G., Gordeychik B.N., Muravyev Ya.D., Yagodzinski G.M.

¹ Университет Лидса, г. Лидс, Великобритания;

e-mail: gy111t@leeds.ac.uk

² Университет Эдинбурга, г. Эдинбург, Великобритания

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

⁴ Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка

⁵ Университет Южной Каролины, Колумбия, США

Для определения источника высоких содержаний бора и его изотопов в вулканических породах, а также для выяснения способа доставки этих компонент в магматические расплавы, проанализированы минералы из пород и ксенолитов Камчатки на содержания В и $\delta^{11}\text{B}$. Установлено, что богатые бором флюиды практически не взаимодействуют с жильными минералами ксенолитов.

Введение

Метасоматизированная водным флюидом островодужная мантия часто рассматривается как один из мантийных резервуаров, обогащенный подвижными с флюидом элементами, включая В, Li, Cs, As, Sb, Ba, Rb, Pb, который при условии водного плавления должен способствовать обогащению по этим элементам островодужных вулканических пород. Доказательствами плавления островодужной мантии в присутствии водного флюида являются метасоматические амфибол-флогопит-пироксеновые жилы, содержащиеся в мантийных ксенолитах, доставленных на поверхность островодужными вулканами. Мы измерили содержания В и изотопов $\delta^{11}\text{B}$ в минералах из таких метасоматических жил из мантийных ксенолитов вулканов Авачинский и Шивелуч (Камчатка).

Результаты исследования

Жильные минералы в ксенолитах Авачинского вулкана обнаруживают низкие концентрации бора (0.2-0.9 мкг/г) при низких значениях $\delta^{11}\text{B}$ (от -16.6‰ до -3.6‰), в то время как содержания бора в жильных минералах ксенолитов вулкана Шивелуч достигают 3.1 мкг/г при несколько более высоком значении $\delta^{11}\text{B}$ (от -13.8‰ до $+0.9\text{‰}$, рис. 1). Безводные минералы при этом характеризуются также низкими концентрациями бора (0.3-2.1 мкг/г) и низкими значениями $\delta^{11}\text{B}$ (от -13.8‰ до -3.2‰ , [17]). Жильные минералы в камчатских ксенолитах лишь незначительно обогащены по бору, в сравнении с деплетированной мантией [9], а их значения $\delta^{11}\text{B}$ не достигают значений, опубликованных ранее для камчатских вулканических пород (В = 11.2-36.3 мкг/г; $\delta^{11}\text{B}$ от -3.7‰ до $+5.6\text{‰}$; [5]). Низкие значения бора и $\delta^{11}\text{B}$ в номинально безводных минералах ксенолитов сравнимы с ранее исследованными мантийными составами [4].

Обсуждение результатов и моделирование

Таким образом, наши данные демонстрируют, что плавление метасоматических жил даст ничтожно малый вклад бора в породы вулканических дуг. Это довольно неожиданный результат, вопреки существующим представлениям о метасоматизированном мантийном клине, играющем фундаментальную роль в формировании обогащенных по FME (fluid mobile elements) островодужных

вулканических пород (например, [7]). В то же время, обогащенный бором и ^{11}B компонент должен относительно быстро проходить через мантийный клин в первичный расплав, не успевая реагировать с веществом мантии и минуя исследованные жильные фации. Ограниченная роль осадочного материала в источниках пород Камчатки (435 м пепельно-кремнистой глины; [12]) не предполагает влияния этого источника на систематику бора. Исключительно низкие содержания В (0.2-3.1 мкг/г) и низкое значение $\delta^{11}\text{B}$ (от -16.6‰ до $+0.9\text{‰}$) в жилах мантийных ксенолитов являются продуктами флюидов и расплавов, происходящих из изотопно-легкой субдуцированной и дегидратированной измененной океанической коры, а также, в меньшей степени, из изотопно-тяжелого серпентинитового слоя. Таким образом, простое плавление метасоматических жил в мантийном клине не может объяснить геохимию вулканических пород.

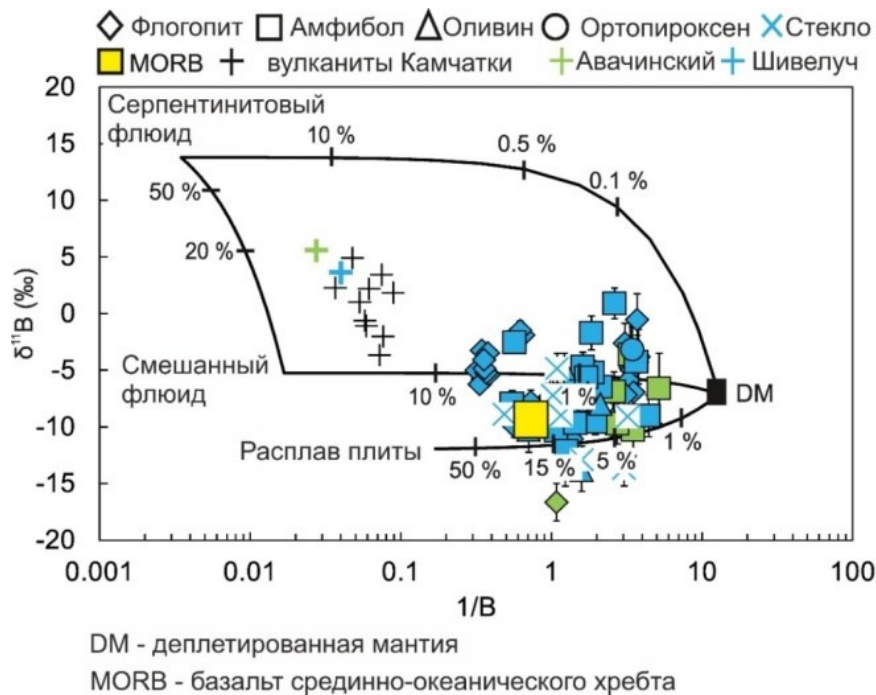


Рис. 1. Диаграмма отношения $\delta^{11}\text{B}$ к $1/\text{B}$ в метасоматических жилах из мантийных ксенолитов вулкана Авачинский (зеленый) и Шивелуч (голубой), в вулканических породах Камчатки [5] и базальтах срединно-океанических хребтов (MORB; [9]). Показана модель смешения между деплетированной мантией (DM; [9]), серпентинитовым флюидом [16], смешанным флюидом от субдуцируемой плиты на глубине 120 км, расплавом субдуцируемой плиты, рассчитанным по [16] с дополнительной стадией дегидратации на глубине 25 км, которая отвечает 80 % потере бора в преддуговой обстановке [15]).

Согласно проведенному компьютерному моделированию, большинство составов жил могут быть воспроизведены путем смешения переменных количеств трех компонентов: (1) изотопно-легкого флюида, отделенного от субдуцируемой океанической плиты, (2) расплава плиты и (3) обедненной мантии (рис. 1). Субдукционные флюиды могут быть получены либо при дегидратации диапиров меланжа в субдуговой мантии под фронтом дуги [10, 15] и/или распадом серпентина также во фронте дуги с последующей дегидратацией измененной океанической коры (АОС) путем распада хлорита и амфибола, как это было ранее предложено в модели Камчатской зоны субдукции [8].

В нескольких предыдущих исследованиях было установлено, что серпентинит может содержать до 80 мкг/г бора и сохранять высокие значения $\delta^{11}\text{B}$ до $+25\text{‰}$ в условиях мелкофокусной субдукции [1, 3, 4, 16]. Результаты нашей модели свидетельствуют о том, что основную роль в формировании обогащенных бором и его

тяжелым изотопом вулканических пород Камчатской дуги играют флюиды, сформированные при дегидратации субдуцирующего преддугового серпентинита и АОС, а не метасоматизированные жилы в субдуговой мантии (рис. 2) [2, 5].

Ранее было показано, что исходно высокое значение $\delta^{11}\text{B}$ в субдукционном флюиде быстро уменьшается по мере удаления от основного места дегидратации, т.е. от фронта дуги [14], если только поток жидкости не захвачен взаимосвязанной сетью мантийных прожилков [11, 13]. Согласно нашим данным, поток флюида через эту жильную сеть должен быть довольно быстрым, чтобы обеспечить крайне ограниченный химический обмен между минералами мантийных жил и субдукционным флюидом (например, [6]). Большие вариации значений $\delta^{11}\text{B}$ в амфиболе и флогопите некоторых образцов (рис. 1) свидетельствуют о том, что жилы, исследованные в данной работе, подвергались множественным импульсам влияния разноглубинных субдукционных флюидов и расплавов.

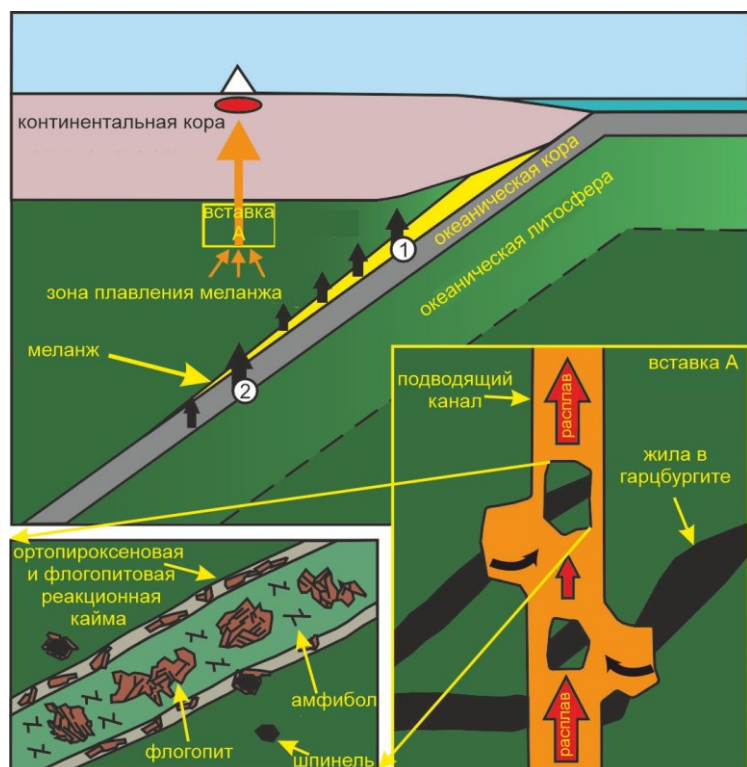


Рис. 2. На Камчатке флюиды субдукционного происхождения (черные стрелки) могут образовываться либо в результате дегидратации меланжевого диапира в мантийном клине [10], либо (1) в результате распада серпентинита в преддуговой зоне или (2) в результате распада хлорита и амфибола в измененной океанической коре на глубине 90-120 км. Богатый бором изотопно-тяжелый субдукционный флюид переносится через субдуговую мантию по взаимосвязанной сети жил, пересекающих мантийные гарцбургиты, фрагменты которых увлекаются магмой (оранжевые стрелки) на пути к поверхности (вставка А). Положение врезки А соответствует глубине захвата ксенолитов (30-50 км).

Заключение

Содержания бора и значения $\delta^{11}\text{B}$ в минералах из жил ксенолитов Камчатской дуги вулканов Шивелуч и Авачинский не согласуются с утверждением, что эти жилы вносят значительный вклад в бюджет бора в вулканических продуктах Камчатки. Жилы регистрируют множественные импульсы флюидов и расплавов, просачивающихся через субдуговую мантию, начиная от изотопно-легких флюидов и расплавов, полученных из измененной океанической коры, и заканчивая изотопно-тяжелыми флюидами, полученными при дегидратации серпентинита. Флюидный поток, по-видимому, сосредоточен в жилах, соединяющих либо участки дегидратации субдуцирующей плиты, либо участки меланжевых диапиров с областью генерации магмы. Такая сеть обеспечивает быстрый перенос изотопно-тяжелого бора в область генерации магмы при ограниченном взаимодействии с минералами мантийных жил.

Работа выполнена в рамках тем НИР ИВиС ДВО РАН № 0282-2019-0004 и ИЭМ РАН № FMUF-2022-0004, РФФИ № 16-55-12040 и NERC (Великобритания).

Список литературы

1. Benton L.D., Ryan J.G., Tera F. Boron isotope systematics of slab fluids as inferred from a serpentine seamount, Mariana forearc // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. V. 187. № 3. P. 273-282. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00286-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00286-2)
2. Churikova T., Wörner G., Mironov N., Kronz A. Volatile (S, Cl and F) and fluid mobile trace element compositions in melt inclusions: implications for variable fluid sources across the Kamchatka arc // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2007. V. 154. № 2. P. 217-239. <http://doi.org/10.1007/s00410-007-0190-z>
3. De Hoog J.C.M., Savov I.P. Boron isotopes as a tracer of subduction zone processes // *Boron isotopes: the fifth element* / Marschall H., Foster G. (Eds). Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 217-247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64666-4_9
4. Harvey J., Garrido C.J., Savov I. et al. ¹¹B-rich fluids in subduction zones: The role of antigorite dehydration in subducting slabs and boron isotope heterogeneity in the mantle // *Chemical Geology*. 2014. V. 376. P. 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.03.015>
5. Ishikawa T., Tera F., Nakazawa T. Boron isotope and trace element systematics of the three volcanic zones in the Kamchatka arc // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65. № 24. P. 4523-4537. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00765-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00765-7)
6. John T., Gussone N., Podladchikov Y.Y. et al. Volcanic arcs fed by rapid pulsed fluid flow through subducting slabs // *Nature Geoscience*. 2012. V. 5. № 7. P. 489-492. <https://doi.org/10.1038/ngeo1482>
7. Kepezhinskas P., Defant M.J. Contrasting styles of mantle metasomatism above subduction zones: constraints from ultramafic xenoliths in Kamchatka // *Subduction: top to bottom*. Geophysical monograph series. V. 96 / Bebout G.E., Scholl D.W., Kirby S.H., Platt J.P. (Eds). 2013. P. 307-314. <https://doi.org/10.1029/GM096p0307>
8. Konrad-Schmolke M., Halama R. Combined thermodynamic–geochemical modeling in metamorphic geology: Boron as tracer of fluid–rock interaction // *Lithos*. 2014. V. 208-209. P. 393-414. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.021>
9. Marschall H.R., Wanless V.D., Shimizu N. et al. The boron and lithium isotopic composition of mid-ocean ridge basalts and the mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. V. 207. P. 102-138. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.03.028>
10. Nielsen S.G., Marschall H.R. Geochemical evidence for mélange melting in global arcs // *Science Advances*. 2017. V. 3, № 4. Art. e1602402. P. 1-7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602402>
11. Pirard C., Hermann J. Focused fluid transfer through the mantle above subduction zones // *Geology*. 2015. V. 43. № 10. P. 915-918. <https://doi.org/10.1130/g37026.1>
12. Plank T. The chemical composition of subducting sediments // *Treatise on geochemistry* V. 4 / Holland H.D., Turekian K.K. (Eds). Oxford: Elsevier, 2014. P. 607-629. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00319-3>
13. Plümpner O., John T., Podladchikov Y.Y. et al. Fluid escape from subduction zones controlled by channel-forming reactive porosity // *Nature Geoscience*. 2017. V. 10. № 2. P. 150-156. <https://doi.org/10.1038/ngeo2865>
14. Prigent C., Guillot S., Agard P. et al. Transfer of subduction fluids into the deforming mantle wedge during nascent subduction: Evidence from trace elements and boron isotopes (Semail ophiolite, Oman) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 484. P. 213-228. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.008>
15. Savov I.P., Ryan J.G., D'Antonio M., Fryer P. Shallow slab fluid release across and along the Mariana arc-basin system: Insights from geochemistry of serpentinized peridotites from the Mariana fore arc // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2007. V. 112. № B9. <https://doi.org/10.1029/2006jb004749>
16. Scambelluri M., Tonarini S. Boron isotope evidence for shallow fluid transfer across subduction zones by serpentinized mantle // *Geology*. 2012. V. 40. № 10. P. 907-910. <https://doi.org/10.1130/g33233.1>
17. Tomanikova L., Savov I.P., Harvey J. et al. A limited role for metasomatized subarc mantle in the generation of boron isotope signatures of arc volcanic rocks // *Geology*. 2019. V. 47. № 6. P. 517-521. <https://doi.org/10.1130/G46092.1>