

УДК 552.32.6 (470.21)

ВОЗРАСТ МАНТИЙНОГО МЕТАСОМАТОЗА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПАЛЕОЗОЙСКОЙ КОЛЬСКОЙ ЩЕЛОЧНОЙ ПРОВИНЦИИ

© 2003 г. В. Р. Ветрин, И. Л. Каменский, С. В. Икорский

Представлено академиком Ф.П. Митрофановым 06.08.2002 г.

Поступило 20.08.2002 г.

В период палеозойской тектоно-магматической активизации (410–360 млн. лет назад) на Кольском полуострове были образованы гигантские нефелин-сиенитовые интрузии Хибин и Ловозера, а также большое количество массивов и дайковых тел щелочно-ультраосновных пород, кимберлитов и карбонатитов. Образованию расплавов предшествовали процессы домагматического метасоматоза, приводившие к обогащению деплетированного мантийного субстрата РЗЭ, Ва, К, Sr, Rb, Th, U, Nb, Р и другими некогерентными элементами [1, 2]. Предполагается, что интервал между процессами мантийного метасоматоза и образованием расплавов был относительно кратковременным, что препятствовало накоплению радиогенных изотопов в мантийном субстрате, подвергавшемся в последующем процессам парциального плавления. Оценки времени проявления мантийного метасоматоза, сделанные в результате изучения Sm–Nd- и Rb–Sr-изотопных систем, приводятся в интервале от ≤ 10 до 450–750 млн. лет назад [1, 3].

Данные о минеральном составе пород верхней мантии Кольского региона получены при изучении ксенолитов шпинелевых перидотитов из дайки кимберлитов в районе г. Кандалакши. Размер ксенолитов колеблется в пределах 1–3 см, они имеют эллипсоидную, неправильную форму и местами составляют до 30–50% объема породы. Ксенолиты сложены гаммой пород от гарцбургитов и лерцолитов до пироксенсодержащих оливинитов. Минеральный состав ксенолитов – оливин, 50–95% (Fo* 88–92%), клинопироксен, 0–15% (mg = 91–93%), энстатит, 5–20% (mg = 89–90%), низкотитанистый хромплеонаст, 1–5% (mg = 77–82).

* Fo – форстерит, mg = 100Mg/(Mg + Fe).

Геологический институт
Кольского научного центра
Российской Академии наук,
Апатиты Мурманской области

Концентрации породообразующих и второстепенных элементов в шпинелевых перидотитах позволяют отнести их к деплетированным и сильно деплетированным породам, что подтверждается нахождением точек составов в соответствующих полях мантийных пород, из которых удалена легкоплавкая фракция [4].

Подтверждением важной роли амфиболов в образовании щелочных и карбонатитовых расплавов могут быть многочисленные находки обломков кристаллов и поликристаллических агрегатов роговой обманки в меланефелинитах, ультраосновных лампрофирах и карбонатитах из даек и трубок взрыва в северной части Кандалакшского залива Белого моря. Интерстициальные кристаллы амфибола и флогопита установлены в ксенолитах шпинелевых перидотитов, гранатовых гранулитов, глиммеритов и пироксенитов из ультраосновных лампрофиров и карбонатитов в трубке взрыва и дайковых телах, содержащих ксенокристаллы амфибола. Ксеногенный характер кристаллов амфибола подтверждается наличием вокруг них мелкозернистых закалочных ореолов, а также близостью составов кристаллов этого минерала, включенных в петрографически и петрохимически различные породы. Выполненные изотопные исследования Sr в амфиболе и вмещающем ультраосновном лампрофире из трубки взрыва на о.Еловом показали существенное различие в них величин начальных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (соответственно 0.70768 и 0.70445), что также может интерпретироваться как свидетельство неравновесности кристаллов по отношению к вмещающему лампрофиру.

Ксенокристаллы амфибола достигают в длину 2–3 см, плеохроируют в желтовато-коричневых тонах, и по составу соответствуют калиевым титанистым магнезиогастингситам (табл. 1). При сравнении с “мантийными” амфиболоми различных генетических типов [5, 6] изученные амфиболы наиболее близки роговым обманкам из жил в нодулях мантийных лерцолитов (рис. 1), для которых большинством исследователей предполага-

Таблица 1. Концентрации главных (мас. %) и второстепенных (г/т) элементов в амфиболах

| Компонент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|
| SiO ₂ | 40.16 | 40.76 | 40.02 | 44.5 | 43.02 | 41.6 | 37.08 | 41.57 | 39.32 |
| TiO ₂ | 2.88 | 3.66 | 2.51 | 2.39 | 2.19 | 1.79 | 2.58 | 2.57 | 3.03 |
| Al ₂ O ₃ | 11.94 | 11.57 | 11.72 | 9.04 | 9.92 | 9.42 | 12.99 | 12.28 | 11.44 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.25 | 3.1 | 3.36 | 2.22 | 2.78 | 6.58 | 2.10 | 4.21 | 5.8 |
| FeO | 6.35 | 6.65 | 7.02 | 5.9 | 5.63 | 10.88 | 7.85 | 7.27 | 6.81 |
| MnO | 0.09 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.09 | 0.29 | 0.1 | 0.11 | 0.12 |
| MgO | 14.74 | 14.9 | 15.14 | 16.78 | 16.51 | 10.38 | 14.05 | 14.39 | 13.72 |
| CaO | 12.45 | 10.92 | 11.82 | 11.45 | 12.64 | 9.94 | 12.09 | 10.79 | 12.33 |
| Na ₂ O | 2.59 | 2.88 | 3.19 | 3.33 | 3.35 | 4.32 | 2.41 | 3.11 | 2.84 |
| K ₂ O | 2.07 | 1.5 | 1.6 | 1.29 | 1.18 | 1.34 | 2.88 | 1.53 | 1.44 |
| H ₂ O ⁻ | 0.05 | 0.31 | 0.3 | 0.3 | 0.17 | 0.29 | 0.41 | 0.47 | 0.13 |
| H ₂ O ⁺ | 1.2 | 3.47 | 1.65 | 1.68 | 1.79 | 1.81 | 1.43 | 1.37 | 2.57 |
| | 0.25 | 0.09 | 0.21 | 0.26 | 0.26 | 0.19 | 0.76 | 0.27 | 0.24 |
| CO ₂ | 0.68 | — | 1.64 | 0.42 | 0.67 | 1.44 | 2.97 | 0.32 | — |
| F~O | 0.12 | 0.04 | 0.09 | 0.12 | 0.12 | 0.08 | 0.34 | 0.12 | 0.11 |
| Сумма | 99.58 | 99.89 | 100.19 | 99.54 | 100.08 | 100.12 | 99.36 | 100.14 | 99.68 |
| U | <1 | <1 | 0.24 | 0.35 | 0.29 | 0.41 | 1.5 | 0.63 | <1 |
| Th | 8 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 13 | 7 | 13 |
| Li | 7 | 9 | 9 | 4 | 40 | 12 | 78 | 73 | 3 |
| Nb | — | 14 | 20 | 50 | 50 | 90 | 50 | 50 | 16 |
| Zr | — | 150 | 170 | 310 | 320 | 800 | 490 | 340 | 440 |
| Sr | 590 | 560 | 690 | 410 | 390 | 430 | 1100 | 400 | 530 |
| Ba | — | 1140 | 1040 | 230 | 170 | 570 | 800 | 310 | — |

Примечание. 1 – монокристалл из меланефелинита; 2, 4 – монокристаллы из ультраосновных лампрофиров; 3, 5 – поликристаллические агрегаты зерен из у. о. лампрофиров; 6–9 – монокристаллы из карбонатитов. Прочерк – элемент не определяется.

ется метасоматический генезис. Точки интерстициальных амфиболов располагаются в полях составов соответствующих “мантйных” амфиболов и амфиболов из альпийских перидотитов.

Величина отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в ксенокристаллах амфибола колеблется от $0.3 \cdot 10^{-6}$ до $2.66 \cdot 10^{-6}$ (табл. 2). Последнее значение более чем на 2 порядка выше этого отношения в породах континентальной коры ($\sim 1 \cdot 10^{-8}$) и свидетельствует о вкладе мантийной компоненты в состав захваченного флюида. Принимая оценку величины отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в верхней мантии с возрастом 370 млн. лет как $(1.0-1.3) \cdot 10^{-5}$ [3], для амфибола с максимальным отношением $^3\text{He}/^4\text{He}$ содержание мантийного компонента в захваченном флюиде может быть оценено не менее чем в 20–27%. Вывод о присутствии мантийной составляющей в захваченном флюиде следует и из превышения измеренных (изм) над вычисленными (выч) концентрациями ^3He в большинстве изученных образцов. Как следует из табл. 1 и 2, минимальными значениями отношения $^3\text{He}_{\text{изм}}/^3\text{He}_{\text{выч}}$ харак-

теризуются лишь образцы амфибола с повышенными концентрациями лития, за счет которого в результате ядерных реакций с тепловыми нейтронами происходит образование радиогенного $^3\text{He}^*$ [8].

Оценка возраста мантийного метасоматоза проводилась нами по результатам K–Ar- и ^{40}Ar – ^{39}Ar -датирования амфибола из ультраосновных лампрофиров трубки взрыва на о. Еловом, имеющих возраст 368 ± 15 млн. лет (K–Ar-метод [2]), и из дайки феррокарбонатита на о. Телячем с возрастом 380 ± 7 млн. лет (U–Pb-метод [9]). Возраст ксенокристаллов амфибола из ультраосновных лампрофиров определен K–Ar-методом как 395 ± 15 и 412 ± 16 млн. лет, и возраст интерстициального амфибола (Ar–Ar-метод) – в 393.1 ± 0.8 млн. лет. Для ксенокристалла амфибола из феррокарбонатитовой дайки K–Ar-методом установлен возраст 411 ± 17 млн. лет, и Ar–Ar-методом возраст интерстициальных амфиболов определен в 392.1 ± 1 и 395.6 ± 4.4 млн. лет (рис. 2).

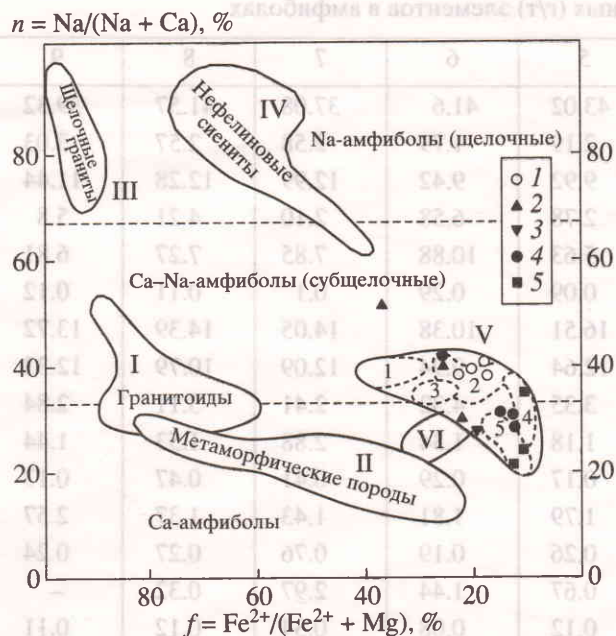


Рис. 1. Диаграмма состава амфиболов в координатах $n = \text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$, % и $f = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$, %. 1–3 – ксенокристаллы амфибола: 1 – из ультраосновных лампрофиров, 2 – из карбонатитов, 3 – из меланефелинита; 4, 5 – интерстициальные амфиболы: 4 – в ксенолитах амфибол-рутил-флогопит-гранатовых пород, 5 – в ксенолитах шпинелевых перидотитов и гранатовых гранулитов. Пунктиром обозначены поля составов “мантийных” амфиболов (поле V): 1 – мегакристаллы, 2 – из жил, 3 – пойкилитовые, 4 – интерстициальные, 5 – из альпийских перидотитов [5, 6]. Поле VI – составы амфиболов из щелочно-ультраосновных пород.

На диаграмме в координатах $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-\text{K}/^{36}\text{Ar}$ точки всех изученных ксенокристаллов амфибола располагаются вдоль эволюционной линии для возраста в 370 млн. лет (рис. 3). Это может свидетельствовать об отсутствии как существенных потерь ^{40}Ar , так и захваченного избыточного радиогенного изотопа этого элемента. Не установлено существенной перестройки изотопных систем и при $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ -датировании интерстициальных амфиболов, что следует из однотипных возрастных спектров этого минерала, конфигурация которых определялась удалением из амфибола преобладающего количества ^{39}Ar (80–90%) в узком температурном интервале $\sim 400^\circ\text{C}$ [2]. Приведенные данные показывают, что изученные амфиболы сохранили свои первичные изотопные характеристики в процессе транспортировки ксенокристов к поверхности расплавами ультраосновного и карбонатитового состава.

Сходство составов изученных амфиболов с мантийными амфиболами, образующими интерстициальные кристаллы и жилы в породах мантии [5, 6], позволяет предполагать метасоматическую переработку мантийного субстрата флюидами или расплавами малых степеней плавления.

Возраст, млн. лет

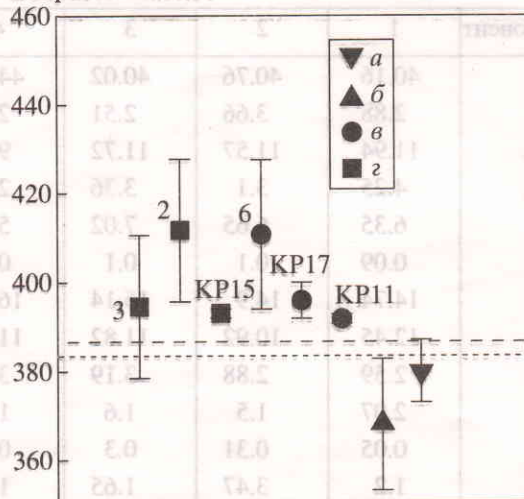


Рис. 2. Диаграмма возрастов амфиболов и вмещающих ксенокристаллы лампрофира и карбонатита. 2, 3, 6 – номера образцов соответствуют номерам в табл. 1, 2; обр. KP11, KP15, KP17 – из [2]. а – карбонатит; б – лампрофир; в, з – амфибол из карбонатита (в) и из лампрофира (з). Вертикальными линиями показаны погрешности определения возраста.

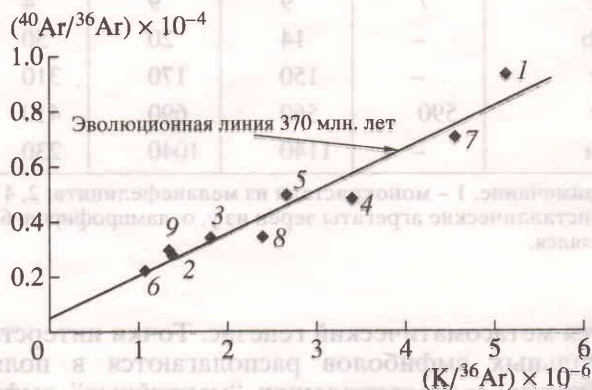


Рис. 3. Диаграмма в координатах $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-\text{K}/^{36}\text{Ar}$. Эволюционная линия является изохроной для возраста 370 млн. лет при атмосферном начальном отношении $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (296). Измерения изотопного состава выполнены на масс-спектрометре МИ-1201 по методике [3]. 1–9 – номера образцов (см. табл. 1).

Метасоматическое преобразование мантийных пород, приводящее к образованию новых минеральных фаз (модальный метасоматоз) или вызывающее увеличение содержаний некогерентных элементов (криптовый метасоматоз), выявлено при изучении глубинных ксенолитов целого ряда районов Земли [10–12]. В ксенолитах метасоматизированных, и в том числе амфиболитизированных, пород установлены стекла щелочного состава [13, 14], что показывает возможность генерации обогащенных щелочами расплавов в

Таблица 2. Результаты изотопного анализа He и Ar в амфиболах

| № п. п. | № обр. | ^4He , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ | ^{40}Ar , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ | $^3\text{He}/^4\text{He}$, $\times 10^{-6}$ | $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ | $\frac{^3\text{He}_{\text{изм}}}{^3\text{He}_{\text{выч}}}$ | К-Ар-воз- раст, млн. лет |
|---------|--------|--|---|--|---------------------------------|---|-----------------------------|
| 1 | 1 | 60 | 31 | 0.72 | 9240 | 64.5 | |
| | 1-1 | 26.3 | 5 | 0.82 | 1548 | | |
| 2 | 2 | 41 | 25 | 0.81 | 2800 | 37.3 | 412 ± 16 |
| | 2-1 | 4 | 1.5 | 1.15 | 760 | | |
| 3 | 3 | 44 | 25 | 0.75 | 3400 | 36.6 | 395 ± 15 |
| 4 | 4 | 36 | 15 | 0.95 | 4780 | 343 | |
| 5 | 5 | 42 | 18 | 0.95 | 4900 | 41 | |
| 6 | 6 | 12 | 23 | 0.3 | 2230 | 11.1 | 411 ± 17 |
| 7 | 7 | 34 | 38 | 0.5 | 6990 | 1.4 | |
| 8 | 8 | 17 | 18 | 0.33 | 3400 | 0.4 | |
| 9 | 9 | 18 | 26 | 1.68 | 2924 | 307 | |
| | 9-1 | 4.3 | 1.7 | 2.66 | 924 | | |

Примечание. Экстракция газов из амфиболов произведена методами дробления (курсив) и плавления по методикам [6]. Номера образцов соответствуют образцам в табл. 1.

результате плавления метасоматизированных мантийных пород. На Кольском полуострове эти процессы были вызваны подъемом девонского плюма, обусловившего интенсивную переработку мантийных пород флюидами мантийного генезиса [3].

Изученные амфиболы являются концентраторами целого ряда породообразующих и редких элементов, характерных для щелочных пород (Ti, Th, U, Nb, Zr, Sr, Ba, см. табл. 1), что свидетельствует о процессах модалного и криптового метасоматоза в деплетированных породах верхней мантии региона, происходивших 392–412 млн. лет назад. Эти данные определяют на 20–40 млн. лет более раннее время проявления мантийного метасоматоза по отношению к времени кристаллизации (380–360 млн. лет назад) ультраосновных и карбонатитовых расплавов, транспортировавших ксенокristаллы амфибола к поверхности.

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 99–05–65158 и 02–05–64394).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kramm U., Kogarko L.N. // *Lithos*. 1994. V. 32. P. 225–242.
2. Beard A.D., Downes H., Vetrin V. et al. // *Lithos*. 1996. V. 39. P. 93–119.
3. Tolstikhin I.N., Kamensky I.L., Marty B. et al. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 2002. V. 66. № 5. P. 881–901.
4. Morgan J. // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. № B12. P. 12375–12378.
5. Best M.G. // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. № 14. P. 2107–2113.
6. Dawson J.B., Smith T.V. // *Miner. Mag.* 1982. V. 45. P. 35–46.
7. Икорский С.В., Каменский И.Л. XV симп. по геохимии изотопов. Тез. докл. М., 1998. С.115.
8. Morrison P., Pine J. // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1955. V. 62. P. 69–92.
9. Claesson S., Vetrin V., Bayanova T., Downes H. // *Lithos*. 2000. V. 51. P. 95–108.
10. Ionov D.A., Dupuy C., O'Reilly Y.O. et al. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1993. V. 119. P. 283–297.
11. Stolz A.J., Davies G.R. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1989. V. 53. № 3. P. 649–660.
12. Konzett J., Sweeney R.J., Thompson A.B., Ulmer P. // *J. Petrol.* 1995. V. 38. № 5. P. 537–568.
13. Francis D. // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1991. V. 108. P. 175–180.
14. Edgar A.D., Lloid F.E., Forsyth D.M., Barnett R.L. // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1989. V. 103. P. 277–286.