



УДК 552.323

© 2009

О. В. Арясова, Я. М. Хазан

Формирование редкоэлементного состава кимберлитов в процессе их перколяционной сегрегации

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Пропонується модель виникнення кимберлітових магм, у якій приймається, що розплави, які виникають у зоні часткового плавлення, досичуються рідкісними та розсіяними елементами (PPE) у процесі фільтраційної сегрегації, імовірно, з виходом на периферію області плавлення. Оскільки мантійні породи на глибинах, що перевищують 6–7 ГПа, є дифузійно врівноваженими, рідкісноелементний склад насиченого розплаву, тобто розплаву, який знаходиться в рівновазі з материнською породою, визначається вмістом PPE в одному з мінералів твердої матриці і не залежить від її модального складу і масового вмісту розплаву. В такій моделі схожість максимальних вмістів PPE у кимберлітових світових провінціях є наслідком повної насиченості розплавів, а розкид спостережуваних значень — варіаціями вмістів PPE у мантійних мінералах, а також існуванням реального або ефективного порогу просочування.

Обогащенность кимберлитов некогерентными элементами указывает на то, что они являются продуктами низкой степени плавления. Например, при однократном плавлении очага, содержание легких редкоземельных элементов (РЗЭ) в котором отмечается в пределах от их содержания в источниках базальтов срединно-океанических хребтов до содержания в ультраосновных породах, хондрит-нормированные обогащения выплавов легкими РЗЭ порядка 10^3 требуют плавления (степень которого не превышает 0,1–0,4%).

Иначе говоря, протокимберлитовые расплавы первоначально присутствуют в мантии в виде рассеянных включений. В то же время единственный механизм, обеспечивающий чрезвычайно быструю (за время от часов до дней [С. Kelley, J.-A. Wartho, 2000]) доставку кимберлитов с глубины порядка 200 км на поверхность (транспортировка в неустойчивых транслитосферных дайках [D. Spence, D. Turcotte, 1990]), требует макроскопических количеств расплава. Следовательно, транспортировке расплава должна предшествовать его фильтрационная сегрегация.

Для проблемы происхождения кимберлитов фундаментальное значение имеет вопрос о том, может ли быть просачивание эффективным при низких степенях плавления, но в настоящее время однозначного ответа на него нет. С одной стороны, теоретические аргументы

указывают на то, что в случае мономинеральных агрегатов, состоящих из одинаковых зерен, включения расплавов возникают на ребрах зерен кристаллической структуры и потому являются связными уже с самого начала процесса плавления, а проницаемость k квадратично зависит от содержания расплава φ : $k \sim \varphi^2$. С другой стороны, эксперименты по плавлению горных пород и синтетических кварцитов [1, 2] указывают на то, что при низких степенях плавления проницаемость значительно меньше, чем предсказывает экстраполяция по закону $k \sim \varphi^2$. Причиной этого может быть скачкообразное уменьшение k при степени плавления, меньшей $\sim 2\%$ из-за того, что основная часть расплава содержится в виде не связанных между собой плоских “карманов” на гранях зерен [1], либо монотонное, но быстрое уменьшение проницаемости по закону $k \sim \varphi^3$, а не φ^2 , как предсказывает теория для простейшей модели кристаллического агрегата [Y. Liang et al., 2001]. В обоих случаях существует реальный или эффективный порог проницаемости частично расплавленных пород.

С вопросом об эффективности фильтрации при низкой пористости непосредственно связан вопрос о том, как пространственно располагается область формирования транслитосферных даек относительно области частичного плавления. Существенным здесь является то, что фильтрация продуктов плавления внутри частично расплавленной области, в которой они возникли, не сопровождается их дополнительным насыщением. Поэтому сегрегация расплавов внутри области плавления означает, что выплавки сразу имеют приблизительно кимберлитовый состав, что возможно только в случае источника, который существенно обогащен легкими РЗЭ по сравнению с примитивной мантией, и низкой степени плавления φ порядка валового коэффициента распределения D_{bulk} , т. е. не превышающей первые десятки процента. При этом, однако, возникает необходимость объяснить очевидное сходство спектров РЗЭ в кимберлитах, наблюдаемых в различных мировых провинциях, в ситуации, когда эти спектры формируются под влиянием большого числа независимых факторов (состав и степень плавления источников метасоматизма, отношение массы метасоматизирующих агентов к массе источника кимберлитовых жидкостей, степень плавления последнего) [3].

Значительная часть этих трудностей снимается, если предположить, что образовавшиеся выплавки дополнительно досыщаются в процессе просачивания, сопровождающего сегрегацию магм, поскольку в пределе полного насыщения содержание примесей в расплаве не зависит от модального состава матрицы и массового содержания расплава [3]. В условиях диффузионного равновесия, существование которого на глубинах, превышающих 6–7 ГПа, подтверждается наблюдениями и оценкой времени диффузионной релаксации [4], единственными параметрами, определяющими состав насыщенного расплава, остаются содержания редких и рассеянных элементов (РРЭ) в минералах мантийных пород, главным образом, в клинопироксене и гранате. Дополнительно, вследствие того, что в диффузионно-уравновешенной породе все приведенные содержания (т. е. отношения содержания в минералах к соответствующим коэффициентам распределения минерал — расплав) равны, независимым единственным параметром является содержание в одном из минералов. Иначе говоря, редкоэлементный состав насыщенного расплава можно полностью определить, если известно содержание РРЭ в одном из минералов и соответствующие коэффициенты распределения.

Для досыщения расплава в процессе просачивания необходимо, чтобы он покинул область плавления или достиг участков, где степень плавления значительно ниже массового содержания фильтрующегося расплава (например, периферия области частичного плавления). Поскольку при этом состав насыщенного расплава не зависит от его величины C ,

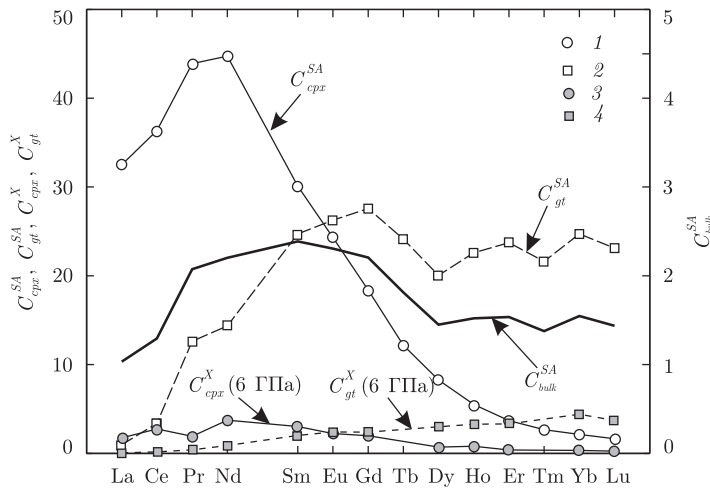


Рис. 1. Содержания РЗЭ в клинопироксене C_{cpx}^{SA} (1) и гранате C_{gt}^{SA} (2), рассчитанные по максимальным содержаниям РЗЭ y_{max}^{SA} в кимберлитах Южной Африки, а также содержания РЗЭ в клинопироксене C_{cpx}^X (3) и гранате C_{gt}^X (4) глубинных (~ 6 ГПа) ксенолитов Южной Африки [5–7], Сибири [9] и полярной Канады [8] (левая ось ординат).

Линия C_{bulk}^{SA} (правая ось ординат) — валовое содержание РЗЭ в породе, содержащей 3% клинопироксена и 6% граната. (Все содержания нормированы на примитивную мантию.)

то допускаются сравнительно высокие значения $\varphi \sim 1\%$, при которых система включений расплава определенно является связанной, а величина k сравнительно высокой. Тем самым снимается проблема сегрегации при сверхнизкой степени плавления.

Следовательно, сравнительно узкий интервал вариаций наблюдаемых содержаний РРЭ в кимберлитах может определяться тем, что максимальные содержания представляют состав расплава в пределе полного насыщения, который зависит фактически только от содержаний РРЭ в одном из минералов, а минимальные — существованием определенного разброса содержаний, а также реального или эффективного порога проницаемости.

В данных предположениях легко рассчитать редкоэлементный состав источников кимберлитов, состав вышлавки из такого источника и состав насыщенного расплава. На рис. 1 показано содержание РЗЭ в клинопироксене C_{cpx}^{SA} (1) и гранате C_{gt}^{SA} (2) породы, находящейся в равновесии с расплавом, состав которого y_{max}^{SA} совпадает с составом наиболее насыщенных кимберлитов Южной Африки, т. е. $C_{cpx}^{SA} = D_{cpx} y_{max}^{SA}$, $C_{gt}^{SA} = D_{gt} y_{max}^{SA}$ (левая ось ординат). Для сравнения на рисунке показаны содержания РЗЭ в клинопироксене C_{cpx}^X (3) и гранате C_{gt}^X (4) глубинных (~ 6 ГПа) ксенолитов, оцененные по данным работ [5–9] (левая ось ординат). Для иллюстрации показано также валовое содержание РЗЭ $C_{bulk}^{SA} = x_{cpx} C_{cpx}^{SA} + x_{gt} C_{gt}^{SA}$ (вкладом остальных минеральных фаз можно пренебречь) в породе, содержащей $x_{cpx} = 3\%$ (клинопироксена) и $x_{gt} = 6\%$ граната (полужирная линия, правая ось ординат). Все содержания нормированы на примитивную мантию.

Как видно из рис. 1, для объяснения максимальных содержаний РЗЭ, наблюдаемых в кимберлитах Южной Африки, достаточно умеренного обогащения (примерно в 1,5–2,5 раза по сравнению с примитивной мантией) валового состава пород C_{bulk}^{SA} средними РЗЭ (эта оценка, естественно, зависит от принятого модального состава). В то же время, содержания в клинопироксене и гранате источников южноафриканских кимберлитов C_{cpx}^{SA} и C_{gt}^{SA} значительно выше, чем содержания C_{cpx}^X и C_{gt}^X в ксенолитах, достигших термодинамического равновесия при давлении ~6 ГПа. В частности, минеральные содержания легких

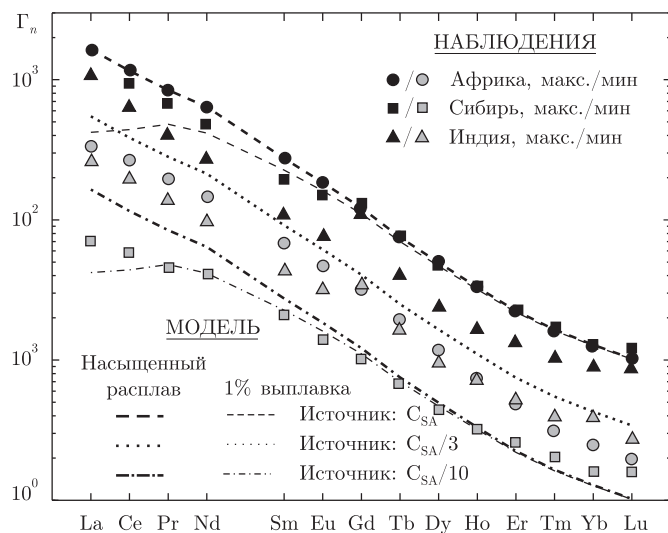


Рис. 2. Хондрит-нормированное содержание Γ_n РЗЭ в магмах, возникающих вследствие плавления источника с содержаниями РЗЭ в клинопироксене и гранате как в источниках наиболее насыщенных южноафриканских кимберлитов (источник C_{SA}), а также источников, содержащих РЗЭ в три и десять раз меньше (источники $C_{SA}/3$ и $C_{SA}/10$). Начальная степень плавления для каждого из источников 1%. В процессе сегрегации расплав может достичь максимального для этого источника насыщения РЗЭ. При этом состав эволюционирует в пределах соответствующего поля. Для сравнения приведены максимальные (черные символы) и минимальные (серые символы) содержания РЗЭ, наблюдаемые в кимберлитах южноафриканской [10] (кружки), индийской [11] (треугольники) и якутской [12–14] провинциях

РЗЭ в клинопироксене источников кимберлитов C_{cpx}^{SA} выше в 20–30 раз, чем в глубинных ксенолитах, а содержания средних и тяжелых РЗЭ в гранатах источников C_{gt}^{SA} превышают содержания в ксенолитах в 5–10 раз. Следует при этом иметь в виду, что содержания C_{cpx}^{SA} и C_{gt}^{SA} — это наименьшие содержания РЗЭ в породе, из которой могут выплавляться наиболее насыщенные РЗЭ кимберлиты или которая может находиться в равновесии с ними. Потому маловероятно, что кимберлиты приобретают свой необычный редкоземельный состав в литосферной мантии кратонов.

Нами рассчитан редкоземельный спектр расплавов, возникающих вследствие плавления диффузионно-уравновешенной породы, минеральные содержания РЗЭ в которой не превышают C_{cpx}^{SA} и C_{gt}^{SA} . Будем считать, что по достижении порога просачивания φ_{th} происходит быстрая сегрегация, при этом выплавки более высокой степени плавления и, соответственно, менее насыщенные РЗЭ не возникают. Если сегрегация происходит внутри источника, то состав магм соответствует начальной выплавке. Расплавы, которые выходят на периферию области плавления, могут достичь полного насыщения. Следовательно, состав магм, поступивших из источника с минеральными содержаниями C_{cpx} , C_{gt} , валовым содержанием C_{bulk} , и валовым коэффициентом распределения D_{bulk} , варьируется от $C_{bulk}/(\varphi_{th} + D_{bulk}(1 - \varphi_{th}))$ до C_{cpx}/D_{cpx} (или, в силу диффузионной уравновешенности, C_{gt}/D_{gt}).

На рис. 2 показан состав магм, возникающих в результате плавления источника ($\varphi_{th} = 1\%$, $x_{cpx} = 0,03$, $x_{gt} = 0,06$). Кроме того, дополнительно предполагается, что содержания РЗЭ в минералах источника могут варьироваться. На рисунке показаны в хондритовой нормировке составы 1% выплавки и насыщенных расплавов для источников, обозначенных $C_{SA}/3$ и $C_{SA}/10$. Для сравнения точками показаны максимальные (черные символы) и минимальные (серые символы) значения, наблюдаемые в южноафриканской [10] (кружки),

индийской [11] (треугольники) и якутской [12–14] провинциях. Для якутской провинции минимальные содержания показаны с учетом Накынского поля.

Таким образом, модель, в которой протокимберлитовые расплавы первоначально возникают в области частичного плавления, а затем досыщаются редкими и рассеянными некогерентными элементами в процессе просачивания, сопровождающего их сегрегацию, вероятно, выходя на периферию области плавления, объясняет многие особенности наблюдаемых редкоэлементных спектров, в первую очередь их удивительное сходство в различных мировых провинциях и выраженную когерентность. К этому можно добавить, что сам факт просачивания кимберлитовых расплавов на значительные расстояния не вызывает никаких сомнений, поскольку во многих случаях метасоматические преобразования, регистрируемые в мантийных ксенолитах, вызваны жидкостями, имеющими, практически, кимберлитовый состав (например, [5; 7]), и, возможно, синхронны кимберлитовому магматизму [15].

Работа частично финансирована грантом для молодых ученых (Постановление Президиума НАН Украины № 57 от 20.02.2008 г.).

1. *Faul U. H.* Permeability of partially molten upper mantle rocks from experiments and percolation theory // *J. Geophys. Res.* – 1997. – **102**. – P. 10299–10311.
2. *Wark D. A., Williams C. A., Watson E. B., Price J. D.* Reassessment of pore shapes in microstructurally equilibrated rocks, with implications for permeability of the upper mantle // *Ibid.* – 2003. – **108**. – P. 2050. – doi: 10.1029/2001JB001575.
3. *Khazan Y., Fialko Y.* Why do kimberlites from different provinces have similar trace element patterns? // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2005. – **6**. – Q10002, doi: 10.1029/2005GC000919.
4. *Арясова О. В., Хазан Я. М.* Диффузионная уравнированность мантийных пород // *Доп. НАН України.* – 2009. – № 4. – С. 100–106.
5. *Grégoire M., Bell D., le Roex A.* Garnet lherzolites from the Kaapvaal craton (South Africa): Trace element evidence for metasomatic history // *J. Petrol.* – 2003. – **44**. – P. 629–657.
6. *Simon N. S. C., Carlson R. W., Pearson D. G., Davies G. R.* The origin and evolution of the Kaapvaal cratonic lithospheric mantle // *Ibid.* – 2007. – **48**. – P. 589–625.
7. *Burgess S., Harte B.* Tracing lithosphere evolution through the analysis of heterogeneous G9-G19 garnets in peridotite xenoliths, II: REE chemistry // *Ibid.* – 2004. – **45**. – P. 609–644.
8. *Schmidberger S., Francis D.* Constraints on the trace element composition of the Archean mantle root beneath Somerset Island, Arctic Canada // *Ibid.* – 2001. – **42**. – P. 1095–1117.
9. *Соловьева Л. В., Лаврентьев Ю. Г., Егоров К. Н. и др.* Генетическая связь деформированных перидотитов и мегакристов граната из кимберлитов с астеносферными расплавами // *Геология и геофизика.* – 2008. – **49**, № 4. – С. 281–301.
10. *le Roex A., Bell D., Davis P.* Petrogenesis of Group I kimberlites from Kimberly, South Africa: Evidence from bulk rock geochemistry // *J. Petrol.* – 2003. – **44**. – P. 2261–2286.
11. *Chalapathi Rao N., Gibson S., Pyle D., Dickin A.* Petrogenesis of proterozoic lamproites and kimberlites from Guddapah basin and Dharwar craton, southern India // *Ibid.* – 2004. – **45**. – P. 907–948.
12. *Богатиков О. А., Кононова В. А., Голубева Ю. Ю. и др.* Петрохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // *Геохимия.* – 2004. – № 9. – С. 915–939.
13. *Кононова В. А., Голубева Ю. Ю., Богатиков О. А. и др.* Геохимическая (ICP-MS геохимия, изотопия Sr, Nd, Pb) гетерогенность кимберлитов Якутии: вопросы генезиса и алмазонасность // *Петрология.* – 2005. – **14**. – С. 227–252.
14. *Костровицкий С. И., Морикю Т., Серов И. В. и др.* Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // *Геология и геофизика.* – 2007. – **48**, № 3. – С. 350–371.
15. *Kinny P. D., Dawson J. B.* A mantle metasomatic injection event linked to late Cretaceous kimberlite magmatism // *Nature.* – 1992. – **360**, No 6406. – P. 726–728.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 28.08.2008

Formation of rare element kimberlite composition in a route of their percolative segregation

We suggest a model of the kimberlite magma origin assuming that the melts arising from a partially molten zone additionally saturate with rare elements (RE) in a route of percolative segregation, possibly reaching the periphery of the molten region. Since the mantle rock at a depth in excess of 6 to 7 GPa is diffusively equilibrated, the RE content of the saturated melt (i. e., the melt which is in equilibrium with the parent rock) depends on RE abundances in only one mineral and is independent of the melt fraction and the matrix modal proportions. In this model, the similarity of the maximum observed patterns is due to the saturated character of the melts, while the abundance scatter results from a variability of the abundances in rock minerals and the existence of a real or apparent percolation threshold.