ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 493, № 1, с. 37–42

ГЕОХИМИЯ

УДК 551.14:550.4

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА УЧАСТИЯ СУБДУЦИРОВАННОЙ КОРЫ В ПРОЦЕССАХ МОДИФИКАЦИИ СУБКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ МАНТИИ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

© 2020 г. Академик РАН В. С. Шацкий[1,2,3,*], А. Л. Рагозин[1,2], О. А. Козьменко[1], А. А. Денисенко[2]

Поступило 16.04.2020 г.
После доработки 04.05.2020 г.
Принято к публикации 06.05.2020 г.

Имеющиеся в настоящее время данные свидетельствуют о сложной эволюции деформированных перидотитов из мантийных ксенолитов, *PT*-параметры которых свидетельствуют о том, что они представляют собой фрагменты метасоматизированной нижней части литосферы кратонов. Зональность, устанавливаемая в гранатах таких ксенолитов в кимберлитовых трубках, интерпретируется как следствие метасоматоза, произошедшего незадолго до попадания ксенолитов на поверхность. Метасоматоз в ксенолитах деформированных гарцбургитов проявляется не только в появлении зональности минералов. Проведенные исследования показывают, что имеется несоответствие между расчетными данными, основанными на содержаниях несовместимых элементов в минералах ксенолитов, и значениями прямых измерений валового состава ксенолитов. С целью определения баланса несовместимых элементов проведены эксперименты по выщелачиванию ксенолитов деформированных лерцолитов из кимберлитовой трубки Удачная. Установлено, что значительная часть легких РЗЭ в исследованных нами ксенолитах присутствует в межзерновом пространстве. Характер распределения несовместимых элементов и, в особенности, наличие положительной Eu-аномалии ясно указывает, что появление межзернового компонента не связано с контаминацией кимберлитовым расплавом. Значительная часть ксенолитов демонстрирует положительную Eu-аномалию, что свидетельствует об участии корового компонента на одной из стадий модификации ксенолитов.

Ключевые слова: верхняя мантия, земная кора, субдукция, перидотит

DOI: 10.31857/S2686739720070178

В настоящее время считается общепризнанным, что ксенолиты деформированных перидотитов из мантийных ксенолитов представляют собой фрагменты метасоматизированной нижней части литосферы кратонов [1, 2]. Зональность, устанавливаемая в гранатах ксенолитов деформированных лерцолитов в кимберлитовых трубках, интерпретируется как следствие метасоматоза, произошедшего незадолго до попадания ксенолитов на поверхность [3–5].

Агашев и др. [6] пришли к заключению, что деформированные перидотиты из кимберлитовой трубки Удачная претерпели сложную эволюцию и были подвергнуты трем стадиям метасоматической модификации. Согласно этим авторам, гранаты с синусоидальным спектром распределения РЗЭ образовывались на первой стадии метасоматоза при взаимодействии гарцбургитов с флюидом/расплавом карбонатитового состава. Со стадией силикатного метасоматоза связано образование клинопироксена и граната с высоким содержанием железа, имеющего распределение РЗЭ, аналогичное таковому в ксенокристаллах граната из кимберлитов. Для этой стадии метасоматоза предполагается астеносферный источник силикатного расплава. Карбонатно-силикатный

[1] *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*
[2] *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[3] *Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*
**E-mail: shatsky@igm.nsc.ru*

метасоматический агент предполагается для формирования деформированных перидотитов из трубки им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) [7]. По мнению этих авторов, центральные части гранатов, имеющие синусоидальный характер распределения РЗЭ, относятся к реликтовой гарцбургитовой ассоциации, а образование внешних кайм гранатов, обогащенных легкими РЗЭ, и клинопироксенов связывается с карбонатно-силикатным агентом.

Метасоматоз в ксенолитах деформированных гарцбургитов проявляется не только в появлении зональности минералов. Проведенные исследования показывают, что имеется несоответствие между расчетными данными, основанными на содержаниях несовместимых элементов в минералах ксенолитов, и значениями прямых измерений валового состава ксенолитов. Измеренные концентрации могут на 70–99% превышать расчетные [8, 9]. Эти несоответствия могут объясняться разными причинами. Одна из них – инфильтрация вмещающего кимберлитового расплава. Однако не только контаминация расплавами, выносящими ксенолиты, может приводить к таким несоответствиям. Зиндлер и Ягоутц [10] сравнили содержания рассеянных компонентов в ксенолитах шпинелевых лерцолитов после выщелачивания с их содержаниями в реконструированном составе, используя концентрации этих элементов в минералах ксенолитов, не содержащих включений. Авторы пришли к заключению, что в ксенолитах присутствуют содержащие рассеянные элементы фазы, которые могут находиться во флюидных включениях и межзерновом пространстве.

Хирага и Колстедт [11] рассмотрели распределение несовместимых элементов не только среди минералов, но также в породе в целом на основании предложенной ими модели структуры породы. Проведенные расчеты с использование данных по химическому составу мантийных ксенолитов позволили им прийти к заключению, что фазы, обогащенные несовместимыми элементами, существуют как внутри зерен, так и в межзерновом пространстве во всех мантийных породах.

Таким образом, имеющиеся в настоящее время данные свидетельствуют о сложной эволюции деформированных перидотитов, *PT*-параметры которых свидетельствуют о том, что они представляют нижние части литосферы кратонов.

В последние годы появился ряд работ, касающихся разных аспектов происхождения и эволюции деформированных ксенолитов кимберлитовой трубки Удачная. Это связано с промышленной отработкой горизонта трубки, содержащей уникально свежие ксенолиты мантийных пород. Агашев и др. [6] показали, что рассчитанные на основании редкоэлементного состава минералов концентрации несовместимых элементов в ксенолитах всегда меньше измеренных в породах. По мнению этих авторов, несовместимые элементы могут присутствовать в микрофазах размером меньше 1 мкм и небольших включениях расплава в силикатных минералах.

С целью определения баланса несовместимых элементов нами проведены эксперименты по выщелачиванию ксенолитов деформированных лерцолитов из кимберлитовой трубки Удачная.

Главные элементы определялись методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S4 Pioneer (“Bruker”, AXS) в ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН. Определение микроэлементного состава выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре высокого разрешения с магнитным сектором ELEMENT (“Finnigan” MAT) в ЦКП “Многоэлементных и изотопных исследований” СО РАН и квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7700 в ЦКП “Байкальский центр нанотехнологий” ИрГТУ (ИРНИТУ).

На первом этапе нами было отобрано 19 образцов наиболее свежих ксенолитов деформированных перидотитов. Размер отдельных ксенолитов превышает 20 см по длинной оси. С целью минимизации влияния процессов контаминации кимберлитом на состав главных и редких элементов ксенолитов для анализа валового состава использовались пластины, выпиленные из центральных частей ксенолитов. У образца уникального по размеру ксенолита УД-1-07 (27 см по длинной оси), а также в образцах УД-11-04 и УД-8-07 были исследованы краевые и центральные части.

Магнезиальность (Mg#) исследованных ксенолитов составляет от 90 до 92%, за исключением образца УД-05-05, в котором Mg# 87%. Содержания CaO варьируют от 0.86 до 2.56%, содержания TiO_2 – от 0.01 до 0.18%, Al_2O_3 – от 0.65 до 4%.

На рис. 1 приведено распределение несовместимых элементов в исследованных ксенолитах деформированных перидотитов. Как видно из графика, распределение несовместимых элементов ксенолитов не может быть объяснено контаминацией вмещающим кимберлитом. Значительная часть ксенолитов имеет положительную Sr-аномалию. В отличие от кимберлита ксенолиты либо не имеют отрицательной аномалии по Zr и Hf, либо демонстрируют положительные аномалии. Кроме того, в отличие от кимберлита большинство ксенолитов демонстрируют ровный характер распределения в области тяжелых РЗЭ. Часть ксенолитов имеет положительную Eu-аномалию (7 из 19). Наиболее сильная положительная Eu-аномалия наблюдаются в образце УД-8-07 (Eu/Eu* +7.3).

У трех ксенолитов был определен редкоэлементный состав центральных и краевых частей.

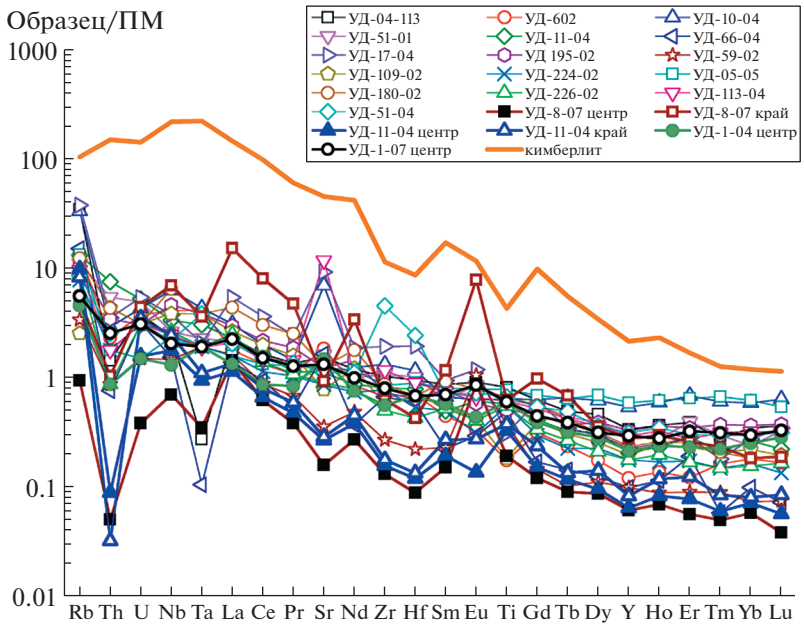

Рис. 1. Распределения несовместимых элементов, нормированных на примитивную манию [15], в ксенолитах деформированных перидотитов.

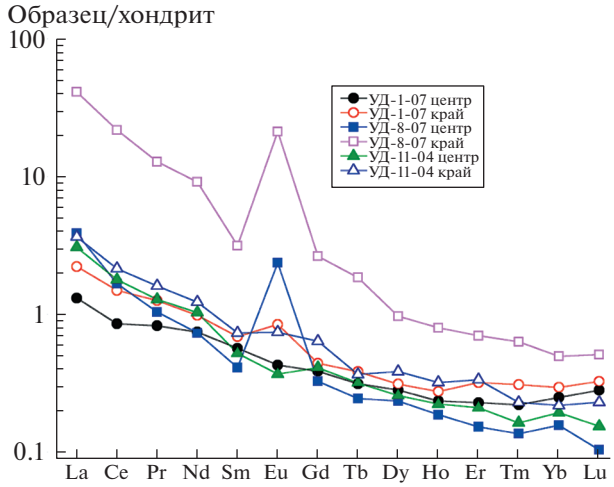

Рис. 2. Распределения РЗЭ, нормированные на хондрит [15], в центральных и краевых частях ксенолитов УД-1-07, УД-8-07 и УД-11-04.

Как видно на графике (рис. 2), в образце УД-1-07 в краевой части присутствует положительная Eu-аномалия, в то время как в центральной части эта аномалия отсутствует. В образце УД-8-07 положительная Eu-аномалия присутствует как в центральной, так и в краевой части ксенолита. В образце УД-11-04 Eu-аномалия отсутствует.

Для экспериментов по выщелачиванию нами отобрано 2 образца деформированных гранатовых лерцолитов, демонстрирующих положительную Eu-аномалию (УД-8-07) и без аномалии (УД-11-04). Были взяты центральные и краевые части образцов, из которых после измельчения были выделены фракции < 0.25 мм. В качестве реагентов использовались слабый раствор 1% HCl, который не является селективным по отношению к РЗЭ и растворяет достаточно много микроакцессорных фаз, таких как карбонаты, апатиты, оксигидроксиды Fe(Mn) и сорбированные на них элементы [12].

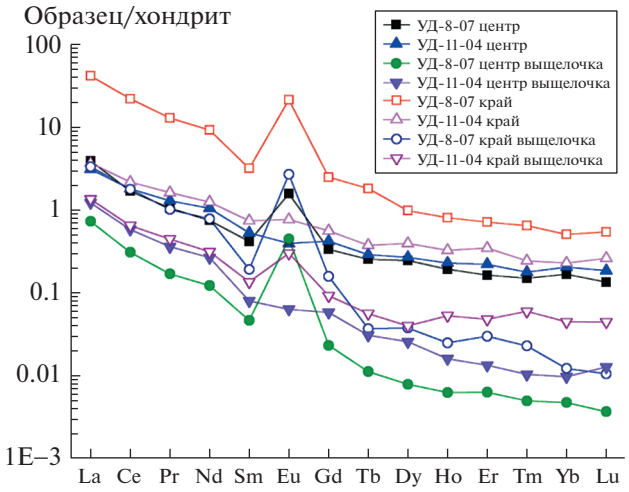

Рис. 3. Распределение редкоземельных РЗЭ в ксенолитах УД-8-07 и УД-11-04 из фракций < 0.25 мм в центральной и краевых частях, а также в выщелочках.

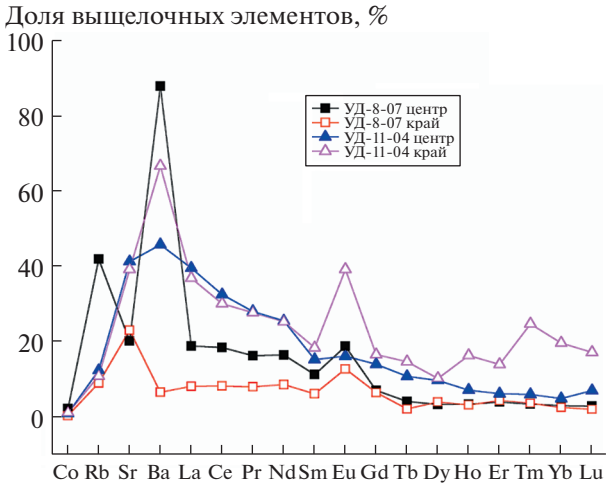

Рис. 4. Количество выщелоченных элементов, выраженное в процентах, для образцов УД-8-07 и УД-11-04.

Для оценки доли перешедших при выщелачивании в раствор элементов по отношению к исходному веществу были выполнены определения макро- и микроэлементов в исходном веществе фракций < 0.25 мкм из навесок ~100 мг. Пробы были разложены по стандартной процедуре смесью $HF + HClO_4$ в соотношении 5 : 1 в стаканчике с закрытой крышкой из PTFE фирмы “Savillex”. После выпаривания и растворения в 6 M HCl пробы были перенесены в пробирки. После соответствующего разбавления РЗЭ и другие микроэлементы были определены методом ИСП-МС.

Полученные аналитические данные по микроэлементному составу выщелочек были пересчитаны по отношению к концентрациям элементов в соответствующих фракциях валовых проб и выражены в %. Данные для образцов УД-8-07 и УД-11-04 приведены на рис. 3 и 4.

Как видно на рис. 3, краевая и центральная части образца УД-8-07 имеют одинаковый характер распределения РЗЭ, однако абсолютные концентрации в краевой части на порядок выше. Распределения РЗЭ в выщелочках аналогичны распределению в породе. Разные части ксенолита и выщелочек демонстрируют сильную Eu-аномалию. Другая картина наблюдается в образце УД-11-04 (рис. 3). Центральная часть и выщелочка имеют близкое распределение РЗЭ без отчетливой Eu-аномалии, при этом краевая часть и выщелочка из нее характеризуются положительной Eu-аномалией.

На рис 4. приведены количества выщелоченных элементов в процентах. У обоих образцов наблюдается тенденция увеличения количества выщелоченного элемента от тяжелых к легким РЗЭ. Так в образце УД-8-07 выщелачивается около 3% тяжелых РЗЭ и около 20% легких. В образце УД-11-04 эти величины больше – ~20 и ~40% соответственно. Из краевой части образца УД-11-04 выщелачивается 40% Eu и 37% La.

Тот факт, что значительная часть ксенолитов демонстрирует положительную Eu-аномалию, свидетельствует об участии корового компонента на одной из стадий модификации ксенолитов. Возможно два варианта появления Eu-аномалии. Согласно первому из них гранатовые перидотиты унаследовали положительную Eu-аномалию от протолитов. Как показывают результаты исследования абиссальных перидотитов срединно-океанических хребтов в процессе серпентинизации гарцбургитов при их взаимодействии с горячими флюидами, появляется сильная положительная Eu-аномалия [13]. Предполагается, что флюиды имеют РЗЭ-характеристики, аналогичные флюидам черных курильщиков. Такие серпентиниты, попавшие в зону субдукции, могут рассматриваться в качестве протолитов ксенолитов деформированных перидотитов, имеющих положительную европиевую аномалию. Согласно второму варианту положительная Eu-аномалия у мантийных перидотитов может появляться при взаимодействии гарцбургитов с силикатными расплавами, унаследовавшими Eu-аномалию от габброидов или перидотитов субдуцированной океанической коры.

Эксперименты по выщелачиванию показывают, что значительная часть легких РЗЭ в исследованных нами ксенолитах присутствует в межзерновом пространстве. Хирага и др. [14] методом растровой просвечивающей электронной микроскопии показали, что химическая сегрегация на границах зерен – универсальное явление, устанавливаемое в природных и синтетических образцах. Хирага и Колстедт [11] предположили существование внутри зерен и на границах зерен фазы, подобной расплаву, в которой аккумулируются несовместимые элементы.

Важно понять время происхождения этого межзернового компонента. Характер распределения несовместимых элементов и, в особенности, наличие положительной Eu-аномалии ясно указывает, что появление межзернового компонента не связано с контаминацией кимберлитовым расплавом. Если появление Eu-аномалии связано с предложенным нами первым сценарием, то появление межзернового компонента может относиться ко времени трансформации серпентинитов в гранатовые перидотиты в зоне субдукции. Если принять во внимание второй сценарий, то появление аномалии связано с тектоно-термальным этапом при котором происходит плавление присутствующих в литосфере фрагментов субдуцированной океанической коры. Второй сценарий является предпочтительным, учитывая вероятную модификацию редкоэлементного состава серпентинитов при их дегидратации в зоне субдукции. Однако тот или иной сценарий должен учитывать установленный факт, что часть ксенолитов деформированных гранатовых перидотитов несут следы присутствия субдукционного компонента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам, замечания которых позволили существенно улучшить статью.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН и ИГХ СО РАН при поддержке РФФИ (проект № 19–05–00394).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simon N.S., Carlson R.W., Pearson D.G., et al.* // Journal of Petrology. 2007. V. 48. № 3. P. 589–625.
2. *O'Reilly S.Y., Griffin W.L.* // Lithos. 2010. V. 120. № 1–2. P. 1–13.
3. *Smith D., Boyd F.R.* // Mantle Xenoliths. Chichester: John Wyllie and Sons, 1987. P. 551–561.
4. *Griffin W.L., Smith D., Ryan C.G., et al.* // Canadian Mineralogist. 1996. V. 34. № 6. P. 1179–1193.
5. *Burgess S.R., Harte B.* // Journal of Petrology. 2004. V. 45. № 3. P. 609–633.
6. *Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., et al.* // Lithos. 2013. V. 160–161. P. 201–215.
7. *Kargin A.V., Sazonova L.V., Nosova A.A., et al.* // Geoscience Frontiers. 2017. V. 8. № 4. P. 653–669.
8. *Schmidberger S., Francis D.* // Journal of Petrology. 2001. V. 42. № 6. P. 1095–1117.
9. *Condie K.C., Cox J., O'Reilly S.Y., et al.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. V. 68. № 19. P. 3919–3942.
10. *Zindler A., Jagoutz E.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1988. V. 52. № 2. P. 319–333.
11. *Hiraga T., Kohlstedt D.L.* // Contribs to Mineral. and Petrol. 2009. V. 158. № 2. P. 149.
12. *Yang J., Torres M., McManus J., et al.* // Chem. Geol. 2017. V. 466. P. 533–544.
13. *Paulick H., Bach W., Godard M., et al.* // Chem. Geol. 2006. V. 234. № 3–4. P. 179–210.
14. *Hiraga T., Anderson I.M., Kohlstedt D.L.* // Am. Miner. 2003. V. 88. № 7. P. 1015–1019.
15. *McDonough W.F., Sun S.S.* // Chem. Geol. 1995. V. 120. № 3–4. P. 223–253.

GEOCHEMICAL EVIDENCE OF THE INFLUENCE OF SUBDUCTED CRUST IN THE PROCESS OF MODIFYING SUBCONTINENTAL MANTLE YAKUTIAN DIAMONDIFEROUS PROVINCE

Academician of the RAS V. S. Shatsky[a,b,c,#], A. L. Ragozin[a,b], O. A. Kozmenko[a], and A. A. Denisenko[b]

[a] *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[b] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

[c] *A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: shatsky@igm.nsc.ru*

Available data indicate a complex evolution of deformed peridotites from mantle xenoliths, which PT parameters indicate that they are fragments of the metasomatized lower part of the craton lithosphere. The zonality established in garnets of such xenoliths from kimberlite pipes is interpreted as a result of metasomatism that occurred shortly before xenoliths hit the surface. Metasomatism in xenoliths of deformed harzburgites is manifested not only in the appearance of zoning of minerals. The studies show that there is a discrepancy between the calculated data based on the contents of incompatible elements in xenolith minerals and the concentration of direct measurements of the bulk composition of xenoliths. In order to determine the balance of incompatible elements, we carried out experiments on leaching xenoliths of deformed lherzolites from the Udachnaya kimberlite pipe. It was found that a significant part of light REE in the studied xenoliths is present in intergranular space. The nature of the distribution of incompatible elements and, in particular, the presence of a positive Eu anomaly clearly indicates that the appearance of the intergranular component is not associated with kimberlite melt contamination. A significant part of xenoliths demonstrates a positive Eu anomaly, which indicates the influence of subducted crust component at one of the stages of xenolith modification.

Keywords: upper mantle, crust, subduction, peridotite