

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И ЭВОЛЮЦИЯ СРЕДЫ ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗОВ УЛЬТРАГЛУБИННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ (МЕСТОРОЖДЕНИЕ САО-ЛУИС, БРАЗИЛИЯ)

Зедгенизов¹ Д.А., Рагозин¹ А.Л., Шацкий^{1,2} В.С., Каги Х.³

¹Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева, г. Новосибирск, e-mail: zed@igm.nsc.ru

²Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, г. Иркутск, e-mail: shatsky@igc.irk.ru

³Геохимический исследовательский центр, Университет Токио, г. Токио, Япония,
e-mail: kagi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp

На протяжении многих лет для характеристики глубинных зон Земли обычно используются теоретические модели, основанные на результатах экспериментальных петрологических исследований и сейсмологических данных. Мантийные образцы с глубины свыше 400 км были недоступны до недавнего времени, когда были описаны алмазы, содержащие минеральные ассоциации, для образования которых необходимы температура и давления, соответствующие условиям на глубинах свыше 660 км. В данном случае алмаз является уникальным геологическим объектом, т.к. этот минерал в течение длительного времени способен сохранять в виде включений в неизменном виде материал, захваченный им в процессе роста. В связи с этим нами были исследованы алмазы из известного месторождения Сао-Луис (Бразилия), содержащие макро- и микровключения, образование которых происходило на глубине сейсмически определяемой переходной зоны и нижней мантии. На основе полученных результатов рассмотрены особенности состава и эволюции вещества сублитосферной мантии и связанных с ними процессов алмазообразования.

В результате проведенных исследований установлено, что большинство изученных нами кристаллов из месторождения Сао-Луис представлено полуокруглыми индивидами со следами частичного растворения. Кроме того, значительную часть алмазов месторождения составляют сростки неправильной формы. В большинстве случаев алмазы из месторождения Сао-Луис имеют зональное внутреннее строение. По данным ИК спектроскопии содержание азота в пределах одного кристалла может варьировать от 0 до 500 ppm. Для всех кристаллов отмечена прямая корреляция содержания азота и водорода. Такая зависимость свидетельствует о сходных условиях вхождения азота и водорода в виде структурных примесей в ультраглубинных алмазах. Содержание азота и водорода в отдельных кристаллах в процессе роста может как увеличиваться, так и уменьшаться. Это свидетельствует о том, что рост кристаллов мог происходить как в закрытой, так и в открытой системах. Отличительной особенностью изученных алмазов является экстремально высокая степень агрегации азотных дефектов (90-100 % V1).

Определение изотопного состава углерода в алмазах ультраглубинного происхождения показало их значительные вариации от 2,6 до -25,3 ‰ $\delta^{13}\text{C}$. При этом во многих кристаллах также отмечены локальные вариации значений $\delta^{13}\text{C}$ (в отдельных кристаллах до 12 ‰ между разными зонами). По данным изучения изотопного состава углерода можно выделить 4 группы алмазов: (i) алмазы со значениями $\delta^{13}\text{C}$, соответствующими среднемантийному диапазону, характерному для большинства алмазов, и в которых изотопный состав углерода значительно не меняется; (ii) алмазы, в которых $\delta^{13}\text{C}$ в периферийной зоне уменьшается на 5-7 ‰ от среднемантийных значений (-5‰) в центральной части кристаллов; (iii) алмазы с облегченным изотопным составом углерода (-12÷-17‰), в которых значение $\delta^{13}\text{C}$ к краям кристаллов увеличивается на 2-5 ‰; (iv) алмазы с легким изотопным составом углерода (-20÷-25‰) в центре, в которых значение $\delta^{13}\text{C}$ к краям кристаллов увеличивается до 12 ‰.

Среди минеральных включений в исследованных алмазах более 50% процентов составляют мейджоритовые гранаты эклогитового парагенезиса (\pm клинопироксен), CaSi-перовскит (\pm CaTi-перовскит) и алюмосиликатные фазы с переменным соотношением Al и Si. Часто также встречаются включения MgSi-перовскита, ферропериклаза (mg# 20-85), TAPP (тетрагональный гранат пиропового состава), коэсита и Fe-сульфидов. По данным КР-

спектроскопии установлено, что включения сохраняют высокое остаточное давление (>30 кбар по смещению пиков коэсита). Отмечены редкие включения, представленные ассоциацией шпинель+Na-силикат, а также магнетитом, ильменитом, металлическим железом, рутилом, цирконом.

Для характеристики состава и эволюции минералообразующей среды алмазов месторождения Сао-Луис было проведено изучение флюидсодержащих микровключений. Установлено, что вода и карбонаты не являются основными компонентами захваченных микровключений в алмазах ультраглубинного происхождения. Лишь в редких случаях в спектрах ИК поглощения отмечается присутствие карбонатных и силикатных фаз. Валовый состав главных микровключений показывает преобладание Ca, Fe и Al и существенное обеднение Mg. Для редких элементов в целом характерно обогащение Ti и V и обеднение Sr, LREE и Ni.

Таким образом, впервые установлено, что большая часть исследованных алмазов из месторождения Сао-Луис имеет многостадийную историю роста со значительно меняющимися условиями роста. Предельно высокая степень агрегации азота в суперглубинных алмазах является следствием их сверхглубинного образования при высоких температурах, а не длительного пребывания в мантии. При крайне редкой встречаемости среди включений в алмазах месторождения Сао-Луис обычных минералов мантийных пород (оливина, граната, энстатита и др.), полученные нами оригинальные результаты позволяют сделать вывод о преобладающей роли субстратов, обогащенных Ca, Fe, Si и Al. Наиболее вероятным источником таких субстратов могут быть глубоко субдуцированные породы метасоматизированной океанической литосферной плиты. В нескольких алмазах из Сао-Луис нам удалось обнаружить многочисленные микровключения, подобно тем, которые представляют материал материнской среды в волокнистых алмазах, образовавшихся в субконтинентальной литосферной мантии. ИК спектроскопия показывает, что, в отличие от литосферных алмазов, вода и карбонаты не являются основными компонентами микровключений в суперглубинных алмазах. Результаты исследований методами просвечивающей электронной микроскопии позволяют предположить, что микровключения могут содержать вещество с легким атомным весом содержащихся в нем элементов (например, CH₄ или H₂). Это свидетельствует о существенно восстановительных условиях среды кристаллизации таких алмазов.

Необычные минеральные ассоциации, которые отнесены к фазам переходной зоны и нижней мантии, были описаны ранее в алмазах из россыпей реки Сао-Луис в Бразилии [Kesson, Fitzgerald, 1991; Harte et al., 1999]. Согласно опубликованным данным, практически все включения в алмазах из россыпей провинции Джуина в Бразилии (Сао-Луис, Мутум, Вермельо и Корриго-Чикория) относятся к нижнемантийной перидотитовой ассоциации [Kaminsky et al., 2001]. Полученные нами результаты по месторождению Сао-Луис свидетельствуют о преобладающей роли алмазоносных пород, обогащенных Ca, Fe, Si и Al. Согласно опубликованным данным алмазы эклогитового парагенезиса также широко распространены и в других месторождениях алмазов ультраглубинного происхождения [Brenker et al., 2005; Bulanova et al., 2010], в то время, как они составляют незначительную долю в большинстве месторождений литосферных алмазов. Взаимосвязь между алмазами из эклогитов верхней мантии и переходной зоны и алмазами из перидотитов нижней мантии позволяет по-новому оценить состав и строение мантии и образование алмазов.

С учетом данных по датированию включений высказано предположение, что образование сублитосферных алмазов связано с начавшимся в позднем мезозое погружением океанической плиты в западной части тогда еще суперконтинента Гондвана [Harte, Richardson, 2012]. Для включений рутила и циркона определен возраст (Pb/U), который составил 460-465 Ma и 418-512 Ma соответственно. Проведенное нами датирование по включениям циркона и рутила показывает, что существуют алмазы, для которых возраст субстрата соответствует более раннему периоду. Согласно имеющимся данным в это время происходила субдукция в восточной части Гондваны. Предполагается также, что

кимберлитовый вулканизм и распад суперконтинента могут быть связаны с влиянием мантийного плюма, который зарождается на границе ядро-мантия [Torsvik et al., 2010]. Именно с плюмом может быть связано образование железистых алмазообразующих сред, в то время, как наиболее вероятным источником карбонатизированных Са-силикатных расплавов являются метасоматизированные породы погружающейся на глубину нижней мантии океанической плиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского отделения Российской академии наук (интеграционный проект №16).

Литература

Brenker F.E., Vincze L., Vekemans B., Nasdala L., Stachel T., Vollmer C., Kersten M., Somogyi A., Adams F., Joswig W., Harris J.W. Detection of a Ca-rich lithology in the Earth's deep (>300km) convecting mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 236. P. 579-587.

Bulanova G.P., Walter M.J., Smith C.B., Kohn S.C., Armstrong L.S., Blundy J., Gobbo L. Mineral inclusions in sublithospheric diamonds from Collier 4 kimberlite pipe, Juina, Brazil: subducted protoliths, carbonated melts and primary kimberlite magmatism // *Contrib. Miner. Petrol.* 2010. V. 160. P. 489-510.

Harte B., Harris J.W., Hutchison M.T., Watt G.R., Wilding M.C. Lower mantle mineral associations in diamonds from São Luiz, Brazil / In Fei Y. et al., eds., *Mantle petrology: Field observations and high pressure experimentation: A tribute to Francis R. (Joe) Boyd*: Houston, Texas, The Geochemical Society. 1999. P. 125-153.

Harte B., Richardson S. Mineral inclusions in diamonds track the evolution of a Mesozoic subducted slab beneath West Gondwanaland // *Gondwana Res.* 2012. V. 21. P. 236-245.

Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D., Davies R.M., Griffin W.L., Khachatryan-Blinova G.K., Shiryayev A.A. Superdeep diamonds from the Juina area, Mato Grosso State, Brazil // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2001. V. 140. P. 734-753.

Kesson S.E., Fitzgerald J.D. Partitioning of MgO, FeO, NiO, MnO and Cr₂O₃ between magnesian silicate perovskite and magnesio-wuestite: implications for the origin of inclusions in diamond and the composition of the lower mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. III 236. P. 229-240.

Torsvik T.H., Burke K., Steinberger B., Webb S.J., Ashwal L.D. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary // *Nature.* 2010. V. 466. P. 352-355.