

АЛМАЗЫ – ОКНО В МАНТИЮ ЗЕМЛИ

Кузюра А.В.

Мантия — часть Земли (геосфера), расположенная непосредственно под корой и выше ядра. В мантии находится большая часть вещества Земли (68 % массы всей Земли). Мантия есть и на других планетах. Земная мантия находится в диапазоне от 30 до 2900 км. Она имеет массу приблизительно 4.08×10^{21} тонны [Пуцаровский Д. Ю., Пуцаровский Ю. М., 1998].

Процессы, идущие в мантии, оказывают самое непосредственное влияние на земную кору и поверхность земли, являются причиной движения континентов, вулканизма, землетрясений, горообразования и формирования рудных месторождений, являются своего рода движущей силой этих процессов, изменяющих сам облик и состав нашей планеты. Поэтому изучение мантии является актуальной задачей современной науки о Земле. Земная кора и верхняя мантия занимают лишь небольшую часть планеты. Рисунок 1 демонстрирует современное понимание строения Земли и наиболее вероятного распределения давления в ней. Откуда взялась такая картина?

Земля как объект исследования геологии доступна для прямого наблюдения только с поверхности, а о составе и строении земных глубин можно судить лишь по косвенным данным. Поэтому геологи стремятся проникнуть как можно дальше в недра Земли с помощью бурения. Изучение земных недр посредством бурения ограничено 15 км, в основном, по причине температурного предела бурового раствора, действующего как движущая сила среда для забойных двигателей, хладагент и транспортирующая среда для керна. Ниже этого предела возможны только геологические изыскания. В особых геологических обстановках породы с глубины 30-40 км могут быть обнажены практически на поверхности земной коры. Любая информация с больших глубин и тем более, мантийного уровня, основана только на комбинации более или менее косвенных, но взаимосвязанных подходов.

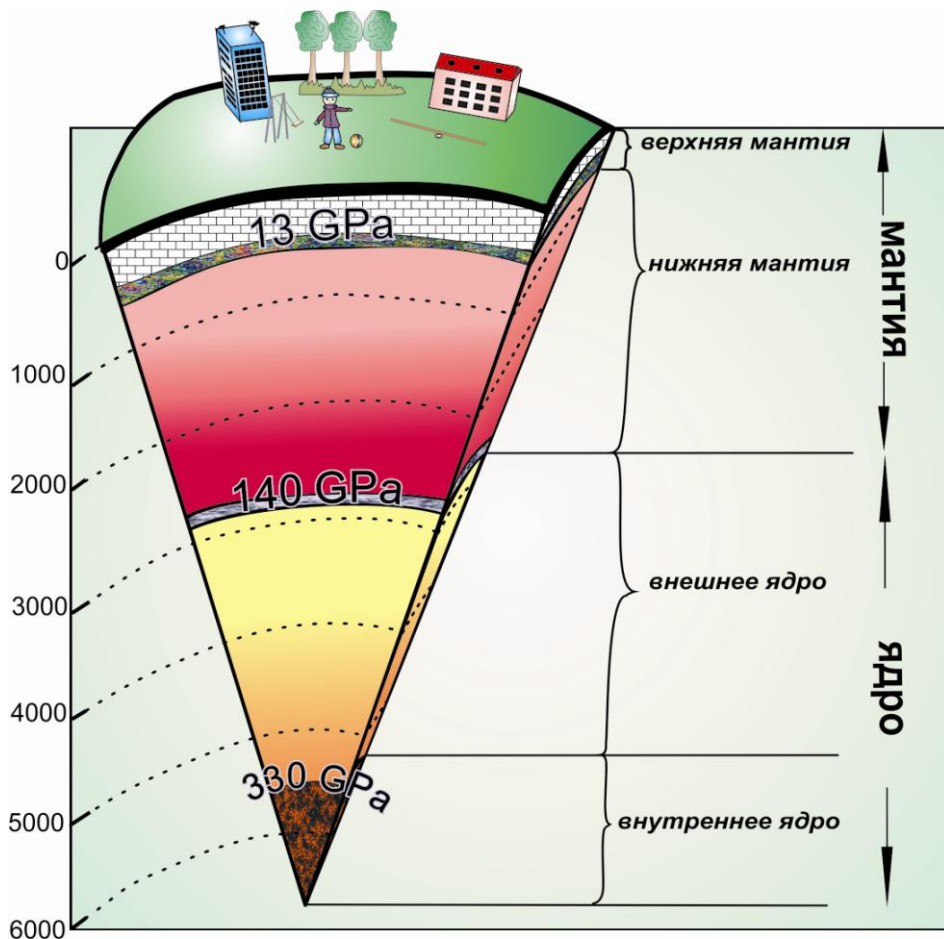


Рис. 1. Схема глубинного давления Земли

1. Астрономия, геофизика и геодезия. Целый спектр свойств Земли может быть изучен напрямую, таких как форма (геоид), масса и момент инерции, магнитное поле и его вариации, скорость сейсмических волн и их зависимость от глубины, и т.д. Причем в интерпретацию геофизических измерений были внесены серьезные коррективы после получения новых данных о реальном глубинном строении земной коры с помощью глубокого и сверхглубокого бурения [Попов, Кременецкий, 1999].
2. Космохимия. Согласно теориям происхождения Солнечной системы, первичная Земля имела хондритовый состав. Учитывая составы металлического ядра и коры, теоретически мы можем подсчитать химический состав мантии.
3. Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия. Она включает в себя лабораторное определение свойств земного материала при известных параметрах давления, температуры и химического состава. Такие экспериментальные данные являются основой для моделирования. С другой стороны, результат эксперимента во многом зависит от входных данных (химического состава, например), эксперимент необходимо базировать на минералогических наблюдениях. Наряду с классической экспериментальной петрологией, которая исследует закаленные продукты

высокобарных опытов после эксперимента, в современной физике минералов ученые проводят эксперименты и изучают кинетику реакции и процессы в режиме реального времени *insitu*.

4. Минералогия. Есть геологические процессы, которые выносят на поверхность Земли материалы с глубин, например, метаморфические породы в горных хребтах могли быть образованы на глубине порядка 100 км и более, а затем подняты при горообразовании. Образцы из мантии могли быть перенесены магмой. Образцы с еще больших глубин могли сохраниться в виде включений в природных алмазах, самом устойчивом к различного рода воздействиям материале.

Таким образом, алмазы и глубинные ксенолиты несут в себе информацию о процессах и условиях, некогда существовавших в мантии.

Кимберлиты, в которых в основном и находят алмазы и *глубинные ксенолиты*,

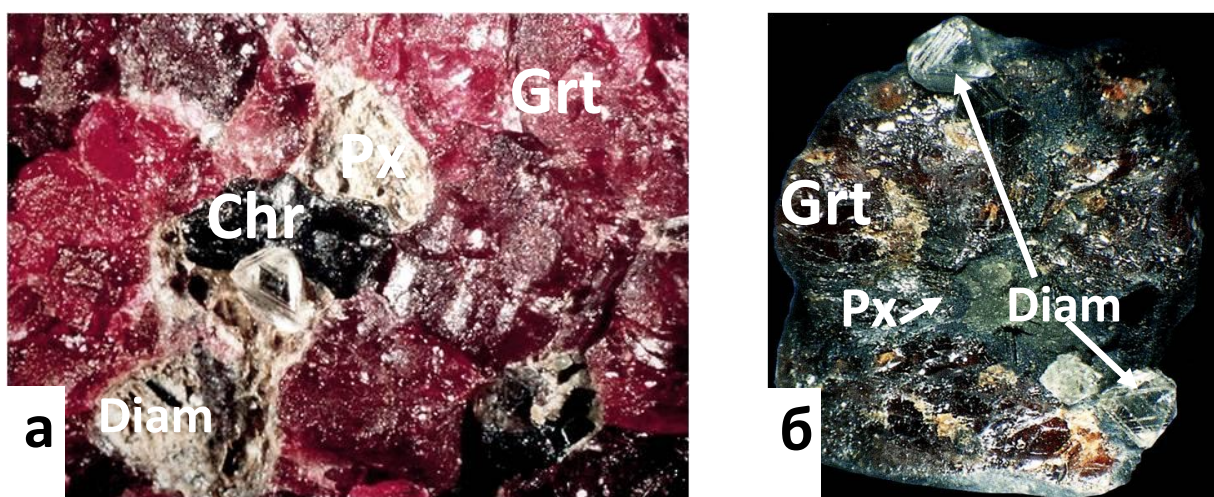


Рис. 2. Глубинные алмазоносные ксенолиты:
а) гарцбургит (фото: A. Menzies); б) эклогит (фото: Gurney)

вскрываются процессами эрозии. Корни кимберлитовых тел уходят далеко в недра Земли, кимберлитовые магмы выносят на поверхность обломки глубинных пород, слагающих земные недра, недоступные для прямых наблюдений, которые называются мантийными ксенолитами.

Ксенолитом называется фрагмент горной породы, который не связан генетически с магматической массой, в которой он найден. Ксенолиты не образуются из магмы, а захватываются магмой при ее подъеме к поверхности. Это может быть единичный кристалл или огромная глыба. Ксенолиты могут представлять собой блоки нижнекоровых формаций, располагавшихся близко к поверхности или, что особенно

важно, обломки пород мантии. Ксенолиты обычно округлые, особенно, если они образованы на больших глубинах. Алмазоносные ксенолиты (рис. 2) представляют особую ценность, поскольку позволяют исследователям определить характеристики пород, в которых образовались алмазы, такие как химический состав, РТ-режим, присутствие флюида и другие параметры. Среди алмазоносных ксенолитов по минеральному составу выделяют две группы. Первую более многочисленную группу составляют образцы эклогитов. Это кристаллические биминеральные горные породы, обедненные кремнием и обогащенные алюминием, состоящие из силикатов кальция и магния - зеленого диопсида и красно-оранжевого граната (альмандина). В качестве второстепенных минералов в них присутствуют оксиды и силикаты алюминия - корунд Al_2O_3 и кианит $Al_2[SiO_4]O$, оксиды титана - ильменит $FeTiO_3$, рутил TiO_2 , а также графит. Вторую группу глубинных ксенолитов составляют гранатовые перидотиты - магматические породы ультраосновного состава, обедненные кремнием и алюминием и обогащенные магнием и железом. Здесь главными породообразующими минералами являются силикаты магния и железа: оливин $Mg_2[SiO_4]$, энстатит $Mg_2[Si_2O_6]$, диопсид $CaMg[Si_2O_6]$ и гранат (пироп). Кроме того, в небольших количествах присутствуют оксиды и сульфиды железа: хромит $FeCr_2O_4$, ильменит $FeTiO_3$, пирротин $Fe_{1-x}S$, пентландит $(Fe,Ni)_8S_9$ [Посухова Т.В., 2000].

Алмазы занимают среди источников информации о мантии особое место. Именно

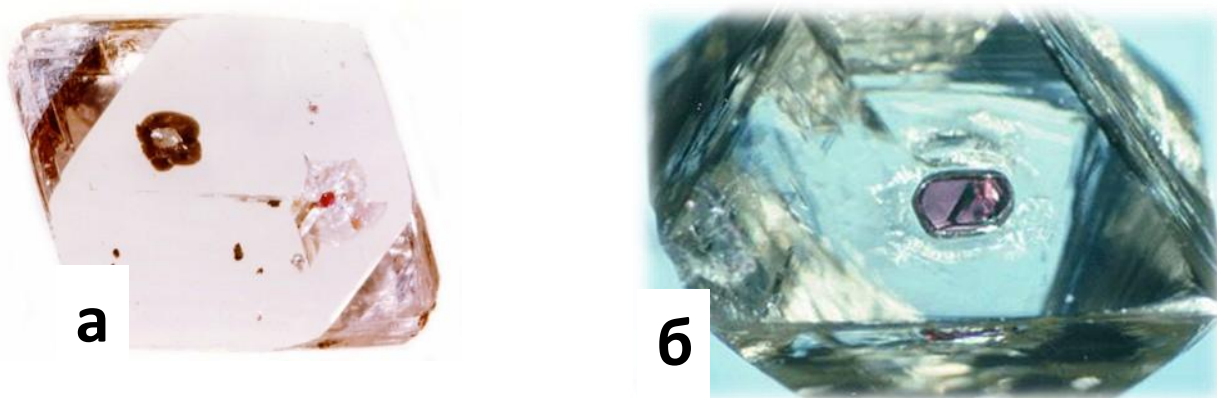


Рис. 3 . Включения в кристаллах алмаза: а) - сульфида (фото С.Тальниковой), б) – граната (Richardson et al. (1984))

в алмазах установлены самые глубинные минералы, которые, возможно, происходят даже из нижней мантии. В таком случае эти алмазы представляют собой самые глубокие фрагменты Земли, доступные непосредственному изучению. Большинство алмазов происходят с глубин 150-200 км в верхней мантии, но установлены минеральные

включения в алмазах, относящиеся к глубинам переходной зоны (410–660 км) [Moore, Gurney, 1985; 1989; Stachel, 2001] и нижней мантии (>660 км) [Scott Smith et al., 1984; Harte et al., 1999; Stachel et al., 2000; Kaminsky et al., 2001].

Кроме изучения амазоносных ксенолитов, особое значение для выяснения происхождения алмаза в мантии Земли и вещества мантии в целом имеет изучение включений в алмазах (рис. 3). Состав первичных включений должен отражать состав расплава, из которого образовался минерал-хозяин (алмаз). Сингенетические включения в алмазах и минералах, слагающих такие мантийные породы как перидотиты, пироксениты, эклогиты, кимберлиты, лампроиты, карбонатиты, алмазоносные карбонатно – силикатные породы типа кокчетавских метаморфитов отличаются большим разнообразием [Посухова Т.В, 2000; Sharp W.E., 1966; Соболев Н.В., Вахрушев В.А., 1967; Буланова Г.П. и др., 1979, 1982; Боткунов А.И и др., 1983; Ефимова Э.С. и др, 1983; Гаранин В.К. и др., 1988; Sobolev N.V., Shatsky V.S., 1990; Shrauder M. & Navon O., 1994; Перчук Л.Л. и др., 1995; Bulanova G.P., 1995; Spetsius Z.V., 1998; Klein-BenDavid O. et al., 2003; Logvinova A.M. et al, 2003; Hwang S.L. et al, 2003; Шарыгин В.В. и др., 2003]. Это оксиды и силикаты, сульфиды и нитриды, карбонаты и фосфаты, карбиды и самородные металлы, вода (лед) и уголекислота, сам алмаз и графит. Детальное изучение их и минерала - "хозяина" позволяет не только уточнить последовательность кристаллизации минералов (в том числе и алмаза), выделить минеральные парагенезисы определенных этапов магматической эволюции глубинного мантийного магматического очага, но и подойти к пониманию химических и физико-химических условий формирования алмаза и сингенетических с ним минералов, расплавов и флюидов. Большинство минеральных включений в алмазах очень малы (~100 мкм) и обычно мономинеральны, однако, встречаются би- и полиминеральные включения. Многофазовые включения представляют особую ценность, поскольку позволяют оценивать температуру и давление среды, в которой они были захвачены и в которой, вероятно, рос кристалл-хозяин, используя проверенные геобарометры и геотермометры. Детальное изучение большого числа минеральных включений позволило разделить все включения на перидотитовые (в основном, гарцбургитовые) и эклогитовые, так называемые П-типа и Э-типа, соответственно. Очень редко, когда в одной кимберлитовой трубке встречаются минеральные включения в алмазах из обеих минеральных ассоциаций, что свидетельствует о том, что в процессе подъема кимберлитовой магмы присутствовало

как минимум 2 области алмазообразования. Алмазоносные ксенолиты Э-типа встречаются чаще, чем ксенолиты П-типа, тем не менее, минеральные включения с перидотитовым минеральным ансамблем встречаются примерно в три раза чаще, чем включения Э-типа [Kirkley et al, 1991].

Благодаря исследованиям флюидно-минеральных микроминеральных включений в волокнистых [Navon et al, 1988; Shrauder M. & Navon, 1994] и облаковидных [Israeli et al, 2001] алмазах, химический состав среды, обеспечивающий рост природных алмазов, установлен. Химические составы таких включений переменны в рамках многокомпонентной системы $K_2O-Na_2O-CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-Fe_2O_3-TiO_2-SiO_2-P_2O_5-CO_2-H_2O-Cl$.

Важно понимать, что формирование ростовых сред для основной массы природных алмазов и сингенетически включенных в них минералов является частью общего процесса магматической эволюции мантийного вещества и сопряжено с ним физико-химически и пространственно. Очевидно, что герметические включения в природных алмазах представляют собой фрагменты гетерогенных алмазообразующих сред, но не минералов вмещающей мантии. Это означает, что материнские среды алмазов и включений, в основе которых - полностью смесимые карбонатно-силикатные расплавы, являются самостоятельными магматическими телами во вмещающих породах мантии. Предположительно, вещество верхней мантии производит карбонатно-силикатные алмазообразующие расплавы под воздействием “метасоматического агента” [Dalton, Presnall, 1998]. То есть, резервуары силикат-карбонатитовых алмазообразующих расплавов образовались во вмещающей гранат-лгерцолитовой мантии в результате ее первичной карбонатизации [Litvin, 2011, 2012]. Образовавшийся расплав, по идее, растворяет в себе минералы вмещающей перидотитовой мантии, а впоследствии, при естественном охлаждении очага эти растворенные минералы кристаллизуются из расплава и мы можем наблюдать их в виде сингенетичных включений в алмазах. Таким образом, включения в алмазе не совсем отражают вещественный состав мантии, но являются подобными ему.

Ученые долгие годы дискутируют по поводу источника углерода для образования алмаза в мантии. Исследования стабильных изотопов углерода, а, точнее, отношения C^{13}/C^{12} , позволили установить два основных источника. Для перидотитовых алмазов источник углерода находится в гомогенной конвективной зоне в пределах мантии (его

C^{13}/C^{12} колеблется в пределах -2 до -9), в то время как для эклогитовых алмазов это соотношение лежит в пределах +3 до -34. Таким образом, углерод для перидотитовых алмазов мог образоваться из компонентов первичной Земли во время ее образования, затем хорошо гомогенизировался благодаря конвекции и остался в таком виде до его превращения в алмаз. Широкий интервал C^{13}/C^{12} эклогитовых алмазов свидетельствует о другой истории источника, скорее всего, этот углерод был погружен вместе с приповерхностными осадками при субдукции [Kirkley et al, 1991].

Кроме роли устойчивых к агрессивным РТ-условиям контейнеров кристаллы алмазы могут служить еще в качестве наковален для создания больших усилий в модельных экспериментах. Для физико-химических исследований при высоких давлениях применяют установки с прозрачными наковальнями из алмазов (рис. 4), обеспечивающие давления до 200 ГПа и температуры до 3000 К. Такие установки компактны (располагаются на столике микроскопа). Маленький образец (10^{-11} - 10^{-14} м³) сжимается

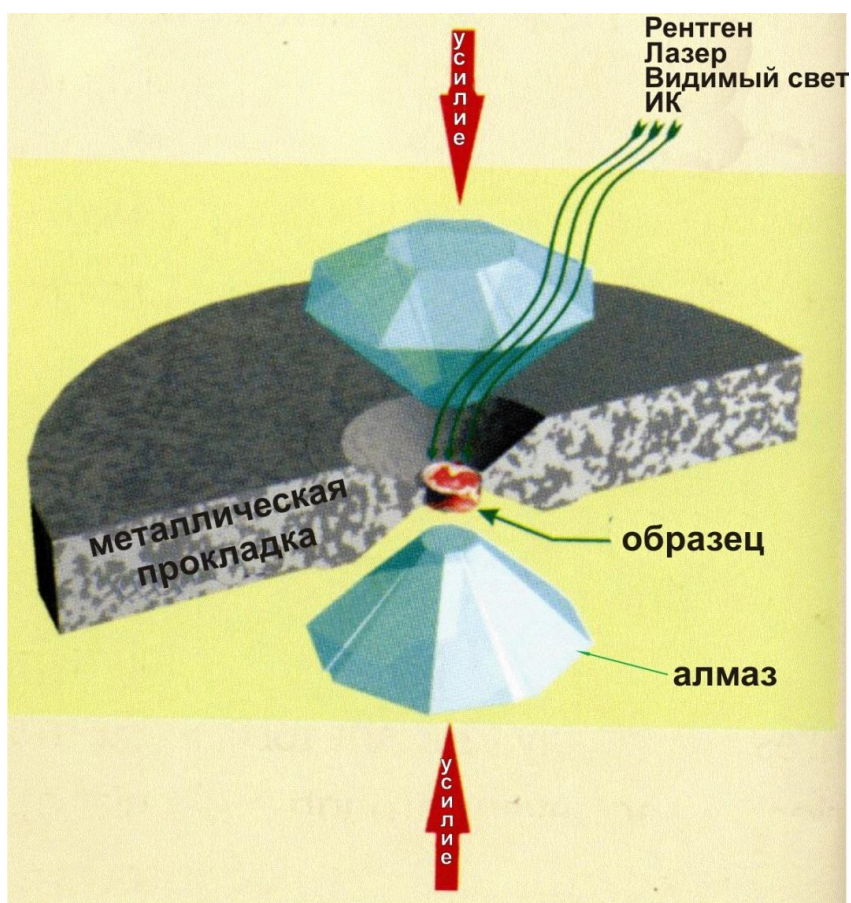


Рис. 4. Схематический разрез алмазных наковален.
[From crust to core and back, 2004]

между двумя алмазами. Нагрев образца осуществляют лазерным лучом. Для измерения давления внутрь аппарата помещают кристалл рубина и следят за его спектром

люминесценции, линия которого смещается с увеличением давления линейно до 30 ГПа. Помимо визуального наблюдения, эти аппараты позволяют проводить исследования методами УФ, ИК, рентгеновской и гамма-резонансной спектроскопии. С использованием алмазных наковален может быть достигнута даже параметры ядра, но образец для испытания слишком мал, что приводит к высокому температурному градиенту и дополнительному напряжению от лазерного нагрева.

Обобщая все вышесказанное, можно смело заявлять, что алмазы, которые в природе ассоциируют с кимберлитовыми трубками, с глубинными ксенолитами, а также применяемые в качестве прозрачных для разного рода излучений наковален в экспериментах по моделированию мантийных процессов, являются своего рода уникальными «окнами в мантию Земли», они помогают пролить свет на наши знания о веществе мантии.

Поддержка: гранты Президента РФ № МК-1386.2013.5, Мин-ва образования и науки РФ (соглашения 8317, 8378) и грантов РФФИ 12-05-33044, 11-05-0040, 13-05-00835

Список использованной литературы:

1. Bulanova G.P. The formation of diamond // Journ. Geochemical Exploration, 1995, V. 53, p. 1-23;
2. Dalton J.A., Presnall D.C., The Continuum of Primary Carbonatitic–Kimberlitic Melt Compositions in Equilibrium with Lherzolite: Data from the System CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂–CO₂ at 6 GPa // J. Petrology, 1998, 39 (11-12):1953-1964.doi: 10.1093/etroj/39.11-12.1953;
3. From Crust to Core and Back / Geomaterials Research at Bayerisches Geoinstitute. Editor F.Seifert. 72 pages
4. Harte, B., Harris, J.W., Hutchison, M.T., Watt, G.R., Wilding, M.C., Lower mantle mineral associations in diamonds from Sao Luiz, Brazil // In: Fei, Y., Bertka, C.M., Myson, B.O. (Eds.), Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation: A Tribute to Francis R. (Joe) Boyd, Chemical Society, Special Publication, 1999, V. 6, pp. 125–154;
5. Hwang S.L., Shen P., Yui T.F., Chu H.C. Metal-sulfur-COH-silicate fluid mediated diamond nucleation in Kokchetav ultrahigh-pressure gneiss // Eur. J. Mineral., 2003, V. 15, p. 505-511;

6. Izraeli E.S., Harris J.H., Navon O. Brine inclusions in diamonds: a new upper mantle fluid // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, V. 187, P. 323-332
7. Kaminsky F. V., Zakharchenko O. D., Davis R., Griffin W. L., Khachatryan-Blinova G. K., and Shiryaev A. A., 2001. Superdeep diamonds from the Juina area, Mato Grosso State, Brazil // *Contrib. Mineral. Petrol.* 140, 734-753;
8. Kirkley, M. B., Gurney, J.J., Levinson, A.A. Age, Origin, and emplacement of Diamonds: Scientific Advances in the last Decade // *Gems and Gemology*, V. 27, N. 1, 1991, pp 2-25
9. Klein-BenDavid O., Logvinova A.M., Izraeli E.S., et al. Sulfide melt inclusions in Yubileynaya (Yakutia) diamonds / VIII Intern. Kimberlite Conf. Victoria, 2003, Extended Abstracts (CD), FLA_0119;
10. Litvin Yu.A. (2011). Mantle origin of diamond-parent carbonatite magma: experimental approaches // *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-3627, EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria, 2-7 April 2011, CD
11. Logvinova A.M., Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Navon O. & Sobolev N.V. Microinclusions in fibrous diamonds from Yubileynaya kimberlite pipe (Yakutia) / In 8th Intern. Kimberlite Conf., extended abstracts, 2003, p. FLA_0025, 22-27;
12. Moore, R.O., and Gurney, J.J. Pyroxene solid solution in garnets included in diamond // *Nature*, 1985. 318, 553-555;
13. Moore, R.O., Gurney, J.J. Mineral inclusions in diamond from the Monastery kimberlite, South Africa // In: Ross, J. (Ed.), *Kimberlites and Related Rocks*, vol. 2. Geological Society of Australia, Special Publication, 1989. V. 14. Blackwell Scientific Publications, Perth, pp. 1029–1041;
14. Navon, O., Hutcheon, I.D., Rossman, G.R., and Wasserburg, G.L. Mantle-derived fluids in diamond micro-inclusions // *Nature*, 1988, V. 335, p. 784-789;
15. Scott-Smith, B. H., Danchin, R. V., Harris, J. W. & Stracke, K. J. (1984). Kimberlites near Ororoo, South Australia // In: Kornprobst, J. (ed.) *Kimberlites I: Kimberlites and Related Rocks*. Amsterdam: Elsevier, pp. 121–142;
16. Sharp W.E. Pyrrhotite: a common inclusion in South African diamonds // *Nature*, 1966, V. 211, № 5047, p. 402-403;
17. Shrauder M. & Navon O. Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, V. 58, p. 761-771;

18. Sobolev, N.V. and Shatsky V.S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks // Nature, 1990. V. 343, p. 742-746;
19. Spetsius Z.V. Two generations of diamonds in the eclogite xenoliths / In: Proc. VII Intern. Kimberlite Conf. Cape Town, 1998, p. 823-828;
20. Stachel T. Diamonds from the asthenosphere and the transition zone // Eur. J. Mineral. 2001, V. 13. P. 883–892;
21. Stachel, T., Brey, G.P., and Harris, J.W. Kankan diamonds (Guinea) I: From the lithosphere down to the transition zone // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2000, v. 140, p. 1–15, doi: 10.1007/s004100000173;
22. Боткунов А.И., Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П. Минеральные включения в гранатах из кимберлитов Якутии // ЗВМО, 1983, Т. 62, № 3, С. 311-322;
23. Буланова Г.П., Варшавский А.В., Лескова Н.В. Свойства и минералогия природных алмазов. Изд. ЯФ СО АН СССР, Якутск, 1979;
24. Буланова Г.П., Шестакова О.Е., Лескова Н.В. Включения сульфидов в Якутских алмазах // ЗВМО. 1982. Т. 111. Вып. 5. С. 557-562;
25. Гаранин В.К., Крот А.Н., Кудрявцев Г.П. Сульфидные включения в минералах их кимберлитов / Изд-во Московского университета, 1988. 45 с;
26. Ефимова Э.С., Соболев Н.В., Поспелова Л.Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // ЗВМО, 1983. Т. 62. № 3. С. 300-309;
27. Литвин Ю.А. Экспериментальные исследования физико-химических условий образования природного алмаза на примере системы эклогит – карбонат – сульфид – алмаз // Геология рудных месторождений, 2012, Т. 54, № 6, с. 523–539
28. Перчук Л.Л., Япаскерт В.О., Окай Ф. Сравнительная петрология алмазоносных метаморфических комплексов // Петрология, 1995, Т. 3, № 3, С. 267-309;
29. Попов В.С., Кременецкий А.А. Глубокое и сверхглубокое научное бурение на континентах // Соросовский Образовательный журнал, Науки о Земле 1999, Науки о Земле;
30. Посухова Т.В. Кимберлиты - природные сверхглубокие скважины // Соросовский Образовательный журнал, 2000, Науки о Земле;
31. Пушаровский Д. Ю., Пушаровский Ю. М. Состав и строение мантии Земли // Соросовский образовательный журнал, 1998, № 11, с. 111—119;

- 32.Соболев Н.В., Вахрушев В.А. Сульфиды в пироповых перидотитах из кимберлитов Якутии // ЗВМО, 1967. V. 96. № 4. p. 450-453;
- 33.Шарыгин В.В., Головнин А.В., Похиленко Н.П., Соболев Н.В. Джерфишерит в неизмененных кимберлитах трубки Удачная-Восточная, Якутия // ДАН, 2003, Т. 390, № 2, С. 242-246